



# Modélisation électromagnétique rapide de problèmes multi-échelles incluant une partie variable - Application à la dosimétrie numérique et au couplage entre antennes

Zakaria Guelilia

## ► To cite this version:

Zakaria Guelilia. Modélisation électromagnétique rapide de problèmes multi-échelles incluant une partie variable - Application à la dosimétrie numérique et au couplage entre antennes. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. INSA de Rennes, 2014. Français. NNT : 2014ISAR0006 . tel-01127280

**HAL Id: tel-01127280**

**<https://theses.hal.science/tel-01127280>**

Submitted on 7 Mar 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**THESE INSA Rennes**  
*sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne*  
pour obtenir le titre de  
**DOCTEUR DE L'INSA DE RENNES**  
*Spécialité : Électronique et Télécommunications*

présentée par

**Zakaria Guelilia**

**ECOLE DOCTORALE : MATISSE**  
**LABORATOIRE : IETR**

**Modélisation  
électromagnétique rapide  
de problèmes multi-échelles  
incluant une partie variable**

**Application à la dosimétrie  
numérique et au couplage  
entre antennes**

**Thèse soutenue le 21.10. 2014**  
devant le jury composé de :

**Michel Ney**

Professeur, Telecom Bretagne / *Président*

**David Lautru**

Professeur, Université Paris Ouest Nanterre La Défense / *Rapporteur*

**Alain Reineix**

Directeur de Recherche CNRS, XLIM / *Rapporteur*

**Alexandre Laisne**

Docteur Ingénieur, DGA Techniques aéronautiques / *Examineur*

**Raphaël Gillard**

Professeur, INSA de Rennes / *Co-directeur de thèse*

**Renaud Loison**

Professeur, INSA de Rennes / *Directeur de thèse*



Modélisation électromagnétique rapide de  
problèmes multi-échelles incluant une partie  
variable

—

Application à la dosimétrie numérique et au  
couplage entre antennes.

Zakaria GUELILIA





# Remerciements

Avant de commencer les festivités, il est primordial de savoir remercier comme il se doit tous les acteurs de cette thèse sans qui ces travaux n'auraient pu aboutir.

Dans un premier temps, ma première pensée va naturellement à ma famille. Mes parents, mes frères, ma petite sœur adorée, mes tantes, oncles, cousins et cousines. La famille est la base qui permet la construction de fondations solides. De simples remerciements ne suffiront jamais assez pour leur présence au quotidien et leur solidarité. C'est pourquoi je leur dédie ma thèse ainsi que l'obtention de mon titre de Docteur. J'espère les honorer par le fruit de mes efforts et tout le travail accompli.

Dans un second temps, je tenais à remercier chaleureusement mes deux directeurs de thèse. En premier lieu, Renaud, pour son encadrement plus que parfait à mes yeux. J'ai apprécié la confiance qu'il m'a accordée, ses multiples conseils et toutes les heures qu'il a consacrées à diriger ces travaux. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande disponibilité et ses qualités humaines, d'écoute et de compréhension tout au long de cette recherche. Pour continuer, il ne faut surtout pas oublier Raphaël qui a co-dirigé cette thèse. Je tiens à le remercier pour son professionnalisme combiné à un humour à la hauteur de son grand niveau scientifique.

Ensuite, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mes deux rapporteurs de thèse : Alain Reineix, Directeur de recherche à XLIM et David Lautru, Professeur à l'Université Paris Ouest Nanterre la Defense. Merci d'avoir mis à profit vos solides connaissances pour juger mon travail ainsi que le temps accordé à la lecture du manuscrit. Lire vos rapports de thèse fut un grand plaisir.

Je remercie vivement Monsieur Michel Ney, Professeur à l'École Telecom Bretagne, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Merci d'avoir coordonné le déroulement de la soutenance avec autant de professionnalisme. Enfin, j'ai vraiment apprécié qu'Alexandre Laisné, Docteur Ingénieur à la DGA, ait accepté d'examiner mes travaux. Je lui adresse un grand merci pour les remarques pertinentes sur mes travaux et d'avoir mis à contribution ses solides connaissances.

Dans un troisième temps, je voudrais dédier mes remerciements à mes amis. Ma plus grande fierté n'est pas la montagne de connaissance que j'ai pu accumuler au fur et à mesure de mes études. Elle réside principalement dans les personnes qui me font l'honneur de m'entourer. Je suis pleinement conscient de leurs valeurs et je veillerai à ne jamais les décevoir.

Tout d'abord, commençons par mes compagnons de toujours, Najib et Nelson. Le premier, l'homme fort du groupe, véritable guerrier oriental d'un point de vue physique et mental, il m'a offert sa disponibilité à toute épreuve.

Le second est Nelson caractérisé par sa franchise et son honnêteté. Mélange subtil de puissance et de tendresse, je suis toujours admiratif de son affection sans limite.

Puis, il y a Julien Abidhousen, tantôt pilote d'avion, professeur de mathématique, businessman de haut niveau ou bien encore psychologue à ses heures perdues. La rumeur voudrait qu'il ait inspiré les personnages de série tels que Jarod (*Le Cameléon*) et Malcolm (*Malcolm in the middle*). Mais ce qui est sûr, c'est que c'est en tant que meilleur ami que son potentiel est le plus élevé. Choukri, le frère patriote, digne descendant de notre mère patrie, amateur de nourriture et le professionnel des jeux de mots. Notre grande amitié est tout à fait naturelle au vu du nombre de points communs que l'on partage.

Romain ou genzeo pour les intimes : une amitié sans faille depuis plus de 10 ans, doté d'un humour inégalable et rempli d'idées révolutionnaires, j'espère que notre voyage en Algérie se concrétisera.

Ensuite, Émeline, ma première amie féminine et première à avoir mis les pieds chez moi. Spécialiste pour "remixer" les histoires, sa gentillesse et sa présence est toujours aussi agréable, si bien que ses retours sont toujours tant attendus. Mais pourquoi est-elle partie s'exiler si loin ?

Continuons avec Anaïs, membre du trio BFT du taekwondo. Un résumé en une phrase ? "Petite mais costaud !" Bosseuse, sérieuse, elle force clairement

le respect, mais ce comportement de battante est complété par une amitié sincère et chaleureuse.

Élodie, aussi membre du trio BFT, qui mérite le titre de Docteur en amitié mention méga honorable ! Nous étions déjà amis avant de nous connaître, mais ça, elle ne le savait pas encore... Comme elle le dit si bien dans son patois de Boiger, elle sait me mettre "ienb" et m'impliquer dans des plans "guettos" ! Le monde nous attend !

Massy, le dernier débarqué de la bande, adepte de soirée à 0 euros et mauvais joueur, il possède de grandes qualités qui font de lui un vrai "frère" à part entière ; un futur grand médecin de grande renommée.

Je continuerais par une pensée pour Marine Moua, fraîchement mariée, sensible et forte à la fois. Désolé de t'avoir infligé le dur châtement de corriger ma thèse et ma soutenance...

Un spécial remerciement à Jude dixit Jésude, Sloane la manouche, la petite Charlotte et Kawtar la soeur marocaine, notre amitié grandit de jour en jour ! Pour conclure cette partie, je ne veux pas oublier mes amis d'ATRM : Lahoucine, Fred (mon frère de cheveux), Robert, Remi, Serge, Alexandre, Dao, Adime (mon frère africain !), Coralie et Morgan. On ne se lasse jamais des entraînements et des soirées ATRM !

Je risque d'oublier certains, pardonnez moi...

En attendant, je vous suis tous extrêmement reconnaissant, le temps avec vous, mes amis, est si agréable.

Pour finir et ainsi n'oublier personne, j'adresse ces derniers remerciements à tous les collègues et amis de l'IETR. J'ai eu la chance de vous côtoyer pendant ces trois années et vous avez contribué à rendre l'atmosphère de travail des plus sympathiques. D'abord, Benoît qui a toujours su apprécier et profiter de mon humour à sa juste valeur. Mourad et Abdul mes complices de pause, toujours partant pour passer du bon temps à la "cafèt". Mes "prof" ainsi que Simon, Tony, Yvan et bien d'autre, la plupart sont déjà parties vers d'autres horizons professionnels. Une pensée à Romain et Céline, j'espère avoir repris le flambeau de la FDTD et de leur travaux avec autant d'ardeur et d'énergie qu'eux.



# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>i</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Problématique et état de l’art</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	5
1.2 Définition des notions clés de la problématique . . . . .	6
1.2.1 Notion de problématique fortement multi-échelle . . . . .	6
1.2.2 Notion de problématique variable . . . . .	6
1.2.3 Schéma illustratif de la problématique générale . . . . .	7
1.3 Contexte d’application . . . . .	8
1.3.1 Scénario consacré à un problème de dosimétrie . . . . .	8
1.3.2 Scénario consacré à l’étude d’une transmission d’antenne	10
1.4 Vue d’ensemble des différentes méthodes de calcul électroma- gnétique numériques applicables aux problèmes multi-échelles et variables . . . . .	11
1.4.1 Les méthodes 3D temporelles . . . . .	13
1.4.2 Méthodes pour la résolution du problème multi-échelle	15
1.4.3 Méthodes pour la résolution du problème variable . . .	22
1.4.3.1 Approche stochastique . . . . .	23
1.4.3.2 Approche basée sur la construction d’un mo- dèle de substitution . . . . .	26
1.5 Conclusion . . . . .	30
<b>2 La FDTD et ses extensions comme solution à un problème de grande taille</b>	<b>32</b>
2.1 Introduction . . . . .	33
2.2 La méthode FDTD . . . . .	34

2.2.1	Principe . . . . .	34
2.2.2	Contrainte numérique . . . . .	34
2.2.2.1	Contrainte géométrique . . . . .	35
2.2.2.2	Contrainte de dispersion . . . . .	35
2.2.2.3	Contrainte de stabilité . . . . .	36
2.2.3	Traitements spéciaux, post-traitement et modèles utilisés	37
2.2.3.1	Le dipôle infinitésimal . . . . .	37
2.2.3.2	Calcul des paramètres S . . . . .	38
2.2.3.3	Calcul du DAS . . . . .	39
2.2.3.4	Modèle de corps humain utilisé	
	39	
2.2.4	Exploitation de la méthode FDTD : calcul du DAS œil dans Hugo en espace libre . . . . .	41
2.2.4.1	Calcul du DAS en espace libre . . . . .	41
2.3	La DG-FDTD multiniveau et bilatérale . . . . .	44
2.3.1	Principe de la DG-FDTD multiniveau . . . . .	45
2.3.2	Principe de la DG-FDTD bilatérale . . . . .	47
2.3.3	Exploitation de la DG-FDTD : Calcul du DAS dans Hugo en espace libre . . . . .	48
2.3.4	Conclusion . . . . .	51
2.4	Exploitation : Application de la DG-FDTD dans un scénario de dosimétrie fortement multi-échelle . . . . .	51
2.4.1	Présentation du problème . . . . .	51
2.4.2	Configuration de simulation . . . . .	53
2.4.3	Résultats et conclusion . . . . .	54
2.5	Conclusion . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Utilisation d'un Macro-Model dans la DG-FDTD</b>	<b>60</b>
3.1	Introduction . . . . .	62
3.2	Principe de la MM-DG-FDTD . . . . .	62
3.2.1	Première étape . . . . .	63
3.2.2	Seconde étape . . . . .	64
3.2.3	Bilan introductif sur la MM-DG-FDTD . . . . .	65
3.3	Détails de mise en oeuvre . . . . .	65
3.3.1	Description du modèle de substitution et calcul des fonc- tions de transfert . . . . .	65

3.3.1.1	Calcul des fonctions de transfert $\tilde{F}_u^E$ et $\tilde{F}_u^H$ . .	66
3.3.1.2	Calcul des fonctions de transfert $\tilde{G}_u^E$ et $\tilde{G}_u^H$ . .	69
3.3.2	Procédure de détermination du modèle de substitution	69
3.3.3	Synthèse de l'algorithme global de la MM-DG-FDTD .	70
3.4	Validation du modèle de substitution . . . . .	70
3.4.1	Validation n°1 : estimation du champ électrique dans un bloc diélectrique . . . . .	72
3.4.2	Validation n°2 : Étude d'une transmission entre deux antennes filaires . . . . .	76
3.4.3	Conclusion . . . . .	79
3.5	Validation de la MM-DG-FDTD . . . . .	80
3.5.1	Validation n°1 : estimation du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain . . . . .	81
3.5.2	Validation n°2 : étude d'une transmission entre deux antennes ULB . . . . .	85
3.5.3	Conclusion partielle pour la seconde validation . . . . .	92
3.6	Conclusion . . . . .	93
<b>4</b>	<b>Exploitation de la MM-DG-FDTD</b>	<b>95</b>
4.1	Introduction . . . . .	96
4.2	Application dans un problème de dosimétrie : estimation du champ électrique dans l'œil d'un corps humain pour plusieurs positions autour d'un véhicule surmonté d'une antenne . . . . .	96
4.2.1	Présentation du problème . . . . .	97
4.2.2	Configuration de simulation . . . . .	98
4.2.3	Résultats : temps de calcul . . . . .	99
4.2.4	Résultats : valeur du champ électrique pour toutes les positions de l'environnement . . . . .	99
4.2.5	Discussion . . . . .	101
4.2.6	Conclusion partielle sur la 1 <sup>re</sup> exploitation . . . . .	104
4.3	Application dans un problème d'antenne : calcul du coefficient de transmission entre antennes ULB dans un grand environnement complexe et variable . . . . .	104
4.3.1	Présentation du problème . . . . .	104
4.3.2	Configuration de simulation . . . . .	106
4.3.3	Résultats : estimation du paramètre $S_{21}$ . . . . .	107

---

4.3.4	Résultats : temps de calcul . . . . .	107
4.3.5	Seconde étude : nouvelle configuration du problème . .	110
4.3.6	Conclusion partielle sur la 2 <sup>e</sup> exploitation . . . . .	113
4.4	Conclusion . . . . .	114
<b>Conclusion générale et perspectives</b>		<b>115</b>
<b>A Equation de mise à jour de la FDTD</b>		<b>121</b>
<b>B Calcul des fonctions de transfert pour les surfaces de la cage d'excitation</b>		<b>123</b>
<b>C Paramètres électriques de “Hugo” dans la bande [0-100] MHz</b>		<b>127</b>
<b>D Publications personnelles</b>		<b>129</b>
<b>Table des figures</b>		<b>131</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>135</b>

# Introduction générale

## Contexte général de l'étude - Problématique

La simulation numérique est un outil permettant la description de phénomènes physiques réels et complexes afin d'étudier leurs caractéristiques et leurs propriétés. Basée sur l'exploitation de modèles mathématiques, elle sert principalement à prédire théoriquement l'évolution d'un système en fournissant une expérience virtuelle. La première simulation numérique date de 1953, soit peu après les premières créations d'outils informatiques. Connue sous le nom de l'expérience de Fermi-Pasta-Ulam [1], cette simulation numérique a permis l'étude de phénomènes non-linéaires. Devenue au fil du temps incontournable pour la modélisation des systèmes naturels, elle propose d'étudier un problème complexe de manière numérique, évitant ainsi la prise de risque et les différents coûts que peut entraîner une étude réelle.

Une grande panoplie de méthodes de simulation déclinées sous différentes approches (temporelle et/ou fréquentielle) ont été développées. Elles permettent à la simulation numérique d'être couramment utilisée dans plusieurs domaines scientifiques qui vont de la physique à la chimie en passant par l'électromagnétisme. En effet, dans ce secteur, la simulation numérique joue un rôle primordial. Elle vise à déterminer le champ électromagnétique en réponse à une excitation dans un espace comportant des éléments rayonnants (antennes) et des structures variées et hétérogènes (corps humain, systèmes électroniques, etc.). Cette tâche est assurée par une modélisation du milieu de propagation souvent complexe et dynamique.

Afin de rendre une étude la plus fiable et précise possible, il est indispensable de décrire l'objet d'étude au sein de son environnement de manière

réaliste. Cependant, potentiellement très petites, les dimensions des différents objets d'étude placés dans un grand environnement posent de réels problèmes en termes de ressources informatiques et de temps de calcul. De plus, la prise en compte d'une certaine forme de variabilité des scénarios étudiés est de plus en plus souvent requise. Des paramètres intrinsèques à l'environnement ou à l'objet d'étude doivent ainsi souvent être modifiés dans le but d'enrichir une étude (géométrie, configuration spatiale, nature des matériaux, etc.). La considération de cet aspect variable ajoute une autre difficulté majeure pour la simulation numérique.

Les travaux présentés dans cette thèse proposent le développement d'un outil numérique permettant le traitement des aspects variables et multi-échelles dans un problème électromagnétique.

## Motivations et objectifs

Ce projet de thèse a été effectué au sein de l'équipe "Systèmes Rayonnants Complexes" du département "Antennes et Dispositifs Hyperfréquences" de l'Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes (IETR). Il s'inscrit dans la continuité directe des travaux de thèse [2, 3, 4] menés par le laboratoire sur la modélisation numérique rapide des problèmes électromagnétiques. Ces études ont été menées grâce à la méthode des différences finies dans le domaine temporel ou FDTD<sup>1</sup>.

Une nouvelle méthode temporelle à double grille (DG-FDTD<sup>2</sup>) a été développée et validée afin de proposer des schémas rapides de calcul pour la caractérisation d'antennes dans un environnement complexe et de grande taille. L'objectif de cette thèse est de continuer à étendre le champ d'application de la DG-FDTD dans deux contextes présentant un problème variable et multi-échelle. Le premier contexte propose d'évaluer le degré d'exposition d'une personne aux rayonnements électromagnétiques pour plusieurs positions de la personne dans un grand environnement. Le second contexte traite d'une transmission entre deux antennes complexes pour plusieurs positions de l'antenne de réception dans un grand environnement. L'intérêt est de résoudre

---

1. Finite Differences in Time Domain

2. Dual Grid-Finite Differences in Time Domain

des scénarios réalistes tout en optimisant les ressources mobilisées par la simulation numérique. Pour cela, un modèle de substitution est inséré dans la dernière étape de la DG-FDTD afin de remplacer une simulation coûteuse en temps de calcul.

## Organisation du document

Le **premier chapitre** présente dans un premier temps les notions clés de la problématique. Il est suivi dans un second temps par une description des scénarios pour les deux contextes d'application sélectionnés. Enfin, un panorama des méthodes et approches utilisées pour la résolution de problèmes variables et multi-échelles est présenté.

Le **second chapitre** décrit de manière rapide les principes de la FDTD et de son extension la DG-FDTD. Une étude comparative sur le thème de la dosimétrie est effectuée pour ces deux méthodes. La fin de ce chapitre propose d'utiliser la DG-FDTD pour la résolution de deux problèmes s'inscrivant dans deux domaines applicatifs différents. Ces exemples d'utilisation visent à souligner les avantages et les inconvénients de la méthode DG-FDTD face aux contraintes imposées par la problématique.

Le **troisième chapitre** se focalise sur le développement d'une nouvelle méthode nommée MM-DG-FDTD<sup>3</sup> qui associe un modèle de substitution avec la DG-FDTD. Dans un premier temps, son principe général ainsi que sa mise en oeuvre sont détaillés. Ensuite, une validation du modèle de substitution est menée grâce à deux cas canoniques. Dans un dernier temps, la validation de la MM-DG-FDTD est effectuée sur deux études.

Le **quatrième chapitre** propose l'exploitation de la nouvelle méthode développée dans les scénarios identifiés dans le premier chapitre. Le but est de montrer que l'utilisation de la MM-DG-FDTD permet de traiter des problèmes variables et multi-échelles. Une étude sur les performances ainsi qu'une discussion sont proposées.

---

3. MacroModel Based on DG-FDTD

# Chapitre 1

## Problématique et état de l’art

---

1.1	Introduction . . . . .	<b>5</b>
1.2	Définition des notions clés de la problématique . . . . .	<b>6</b>
1.2.1	Notion de problématique fortement multi-échelle . . . . .	6
1.2.2	Notion de problématique variable . . . . .	6
1.2.3	Schéma illustratif de la problématique générale . . . . .	7
1.3	Contexte d’application . . . . .	<b>8</b>
1.3.1	Scénario consacré à un problème de dosimétrie . . . . .	8
1.3.2	Scénario consacré à l’étude d’une transmission d’antenne . . . . .	10
1.4	Vue d’ensemble des différentes méthodes de calcul électromagnétique numériques applicables aux problèmes multi-échelles et variables . . . . .	<b>11</b>
1.4.1	Les méthodes 3D temporelles . . . . .	13
1.4.2	Méthodes pour la résolution du problème multi-échelle . . . . .	15
1.4.3	Méthodes pour la résolution du problème variable . . . . .	22
1.5	Conclusion . . . . .	<b>30</b>

---



## 1.1 Introduction

Pouvoir estimer le champ électromagnétique de manière fiable et rapide présente un grand intérêt dans de nombreux domaines à des fins diverses et variées. Deux exemples sont particulièrement concernés : le domaine de la dosimétrie numérique et l'étude de la transmission entre antennes. Le premier exemple cité nécessite le calcul du débit d'absorption spécifique, débit estimée numériquement à partir du rayonnement électromagnétique absorbé par les tissus humains. Le second cité nécessite le calcul de paramètres comme le coefficient de transmission déterminé à partir des champs électromagnétiques. Dans ces deux domaines, simuler l'environnement et l'objet d'étude relève d'une importance capitale. Pour des raisons de précision et de performance, il est nécessaire de caractériser de manière fidèle l'environnement, la source rayonnante et le milieu de propagation tout en proposant des résultats rapidement exploitables. C'est dans ce contexte que les méthodes de modélisation électromagnétique numérique représentent des outils incontournables. Cependant, au vu de certains critères tels que la complexité de l'environnement ou bien la position et les dimensions de l'objet d'étude, plusieurs obstacles se présentent comme la demande en ressources informatiques ou encore la représentation fidèle de l'objet d'étude. L'estimation du champ devient une tâche ardue et nécessite ainsi l'emploi de méthodes dédiées.

Ce chapitre traite principalement du contexte applicatif de la thèse. La première partie est consacrée à la définition des notions clés de la problématique. Une définition précise de ces notions donne une meilleure appréhension du sujet afin de pouvoir cerner toutes les difficultés imposées. Un schéma conceptuel du problème est ainsi proposée. La seconde partie présente la sélection de deux cas d'étude abordés dans ce sujet de thèse de manière à illustrer notre problématique. Un premier scénario est sélectionné de façon à traiter un problème de dosimétrie tandis qu'un second scénario propose une étude sur la transmission entre deux antennes. Enfin, une vue d'ensemble des différentes méthodes fréquemment utilisées pour analyser les problèmes abordés est proposée. Les principaux avantages et inconvénients de chaque méthode sont discutés.

## 1.2 Définition des notions clés de la problématique

### 1.2.1 Notion de problématique fortement multi-échelle

La problématique multi-échelle est identifiable lorsque, par exemple, il existe un fort contraste d'échelle entre les dimensions de l'objet d'étude et l'environnement (figure 1.1). Lors de simulations électromagnétiques, l'estimation du champ dans des conditions proches du réel nécessite de modéliser l'ensemble du milieu de propagation. L'intérêt est de tenir compte de tous les phénomènes de couplage ou interactions présents au sein d'un même système. Par exemple, la présence d'éléments diffractants à proximité d'une antenne peut venir altérer les performances de cette dernière. Ou encore dans des problèmes de grande taille électrique, un zoom électromagnétique autour de la zone spécifique est souvent indispensable et implique l'utilisation d'une approche à résolution variable. Ainsi, il est nécessaire de choisir les méthodes appropriées à la résolution de ce problème car il représente un défi en termes de temps de calcul, de ressources informatiques mais aussi de précision. La problématique multi-échelle conduit à la mise en place de nombreuses études et travaux consacrés à l'élaboration ou l'optimisation d'outil numérique. Ceci est développé dans la section 1.4.

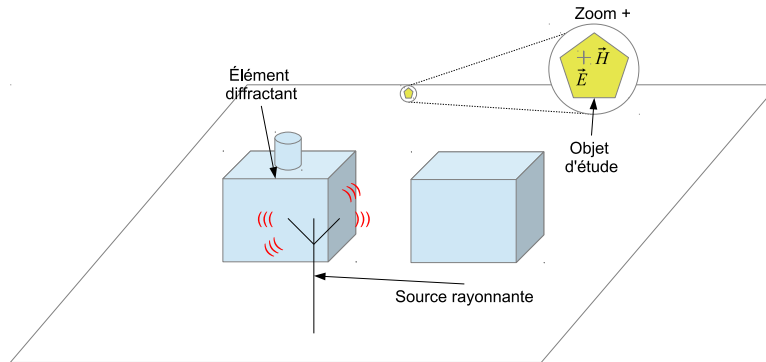


FIGURE 1.1 – Exemple d'apparition de problème multi-échelle

### 1.2.2 Notion de problématique variable

La problématique variable correspond aux situations dans lesquelles l'analyse électromagnétique doit être menée pour plusieurs valeurs d'un ensemble

de paramètres décrivant le cas d'étude. Ces paramètres peuvent être intrinsèques à l'objet d'étude ou à l'environnement dont voici quelques exemples :

- la localisation spatiale de l'objet dans la scène étudiée,
- la nature et la durée d'émission de la source rayonnante,
- les paramètres variables de l'objet d'étude (géométrie de l'antenne, tissus humain, etc.),
- la présence ou non d'éléments diffractants dans l'environnement.

Dans notre étude, seule la position de l'objet d'étude dans l'environnement est prise en compte. Ce paramètre influe grandement sur les résultats que ce soit en termes de degré d'exposition dans un contexte dosimétrique ou de transmission dans un contexte mettant en scène des antennes. La figure 1.2 illustre ce contexte variable.

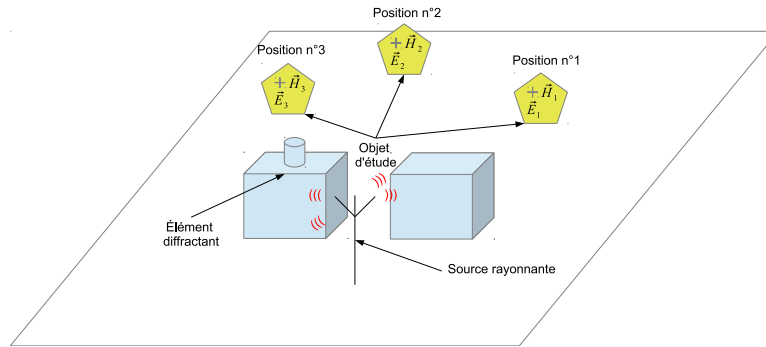


FIGURE 1.2 – Exemple de problème variable

En simulation électromagnétique, l'étude d'une nouvelle position exige généralement le lancement d'un nouveau calcul. Or, dans le cas particulier où le temps de calcul et la demande en ressources informatiques sont importants pour chaque simulation, une étude portant sur l'influence de plusieurs positions sur le résultat devient vite fastidieuse. Ce deuxième contexte apparaît donc aussi comme un défi à relever.

### 1.2.3 Schéma illustratif de la problématique générale

Notre problématique générale correspond à une situation fortement multi-échelle et variable. Nous souhaitons estimer le champ électromagnétique **en un nombre limité de points** dans un objet de **petite taille** :

- situé dans **un grand environnement**,
- pour **différentes positions** dans l'espace.

A partir des notions soulignées dans les sous-chapitres 1.2.1 et 1.2.2, il est désormais possible de donner une illustration de la problématique (figure 1.3). La schématisation de notre problème permet de souligner toutes les difficultés qu'apporte cette étude lors de l'utilisation de simulations électromagnétiques. L'aspect multi-échelle de la problématique impose une stratégie quant aux niveaux de résolution. L'aspect variable doit être pris en compte afin de prévenir toute multiplication superflue de simulations électromagnétiques.

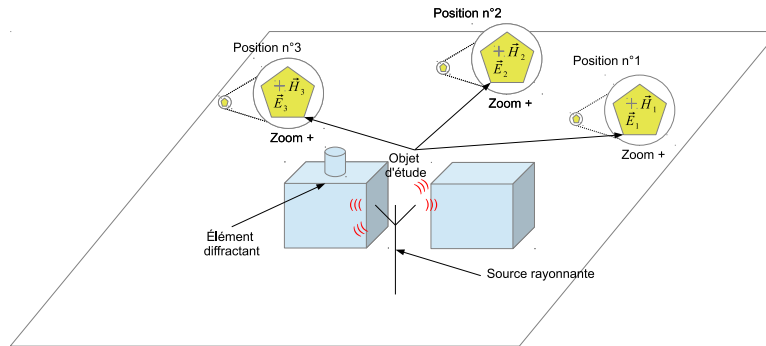


FIGURE 1.3 – Schéma illustratif de la problématique générale

### 1.3 Contexte d'application

Ce chapitre propose des choix de scénarios applicatifs. Les caractères multi-échelles et variables se retrouvent dans ces domaines.

#### 1.3.1 Scénario consacré à un problème de dosimétrie

Le premier scénario est consacré à l'étude d'un problème de dosimétrie EM<sup>1</sup>. La dosimétrie est la détermination quantitative de la dose absorbée par un organisme ou un objet à la suite d'une exposition à des rayonnements électromagnétiques [5]. Au vu de l'omniprésence des ondes électromagnétiques dans notre quotidien, générées naturellement par l'environnement (le soleil par exemple) ou par l'activité humaine, de nombreuses interrogations s'élèvent au sein de la société. Ces principaux questionnements sont pour la plupart liés aux effets biologiques des ondes sur la santé. C'est pourquoi, la dosimétrie

1. ÉlectroMagnétique

numérique est une approche essentielle pour l'évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements électromagnétiques [6, 7]. Une modélisation fidèle des conditions réelles d'exposition du quotidien permet de fournir une estimation plus juste de la dose absorbée.

De nombreuses grandeurs permettent de quantifier cette exposition. La principale employée en dosimétrie correspond au DAS<sup>2</sup> ou SAR<sup>3</sup> en anglais. C'est un indicateur qui renseigne sur la quantité d'énergie absorbée par les tissus et qui se manifeste par l'élévation de la température des cellules [8]. Déterminé en fonction du champ électrique, cette notion distingue le DAS corps entier et le DAS local. Le DAS corps entier évalue la dose absorbée par l'intégralité du corps humain. Le DAS local donne la dose dans un endroit particulier moyenné sur 10 grammes de tissus (DAS 10g) ou 1 gramme de tissus (DAS 1g). Cette mesure est utilisée pour définir des normes d'exposition dans le domaine de la santé publique. Les normes respectées en France sont celles qui ont été définies par l'organisme international ICNIRP<sup>4</sup> [9].

Les principaux travaux de recherche menés en dosimétrie numérique correspondent principalement à l'étude de l'exposition de personnes au voisinage d'un émetteur fixe ou mobile. Ces travaux sont menés pour des applications civiles comme la téléphonie mobile [10] ou pour des applications militaires afin d'évaluer par exemple, l'exposition des combattants sur le champ de bataille [11]. La figure 1.4 illustre un cas rencontré dans un problème de dosimétrie. Dans ce scénario, un modèle de corps humain est soumis aux champs électromagnétiques dans la bande HF/VHF rayonnés par une antenne montée sur un véhicule. Le calcul du DAS local dans un organe tel que l'oeil pose de grandes difficultés. En effet, le diamètre de l'oeil humain est d'environ 2,5 cm tandis que la scène analysée a une longueur et une largeur de 10 m ou plus. Ce contraste très élevé démontre l'aspect multi-échelle du problème. De plus, de manière à pouvoir apprécier les différents degrés d'exposition, il est nécessaire de mener des études pour différentes positions de la personne autour du véhicule. La problématique variable est aussi présente dans cette situation.

---

2. Débit d'Absorption Spécifique

3. Specific Absorption Rate

4. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

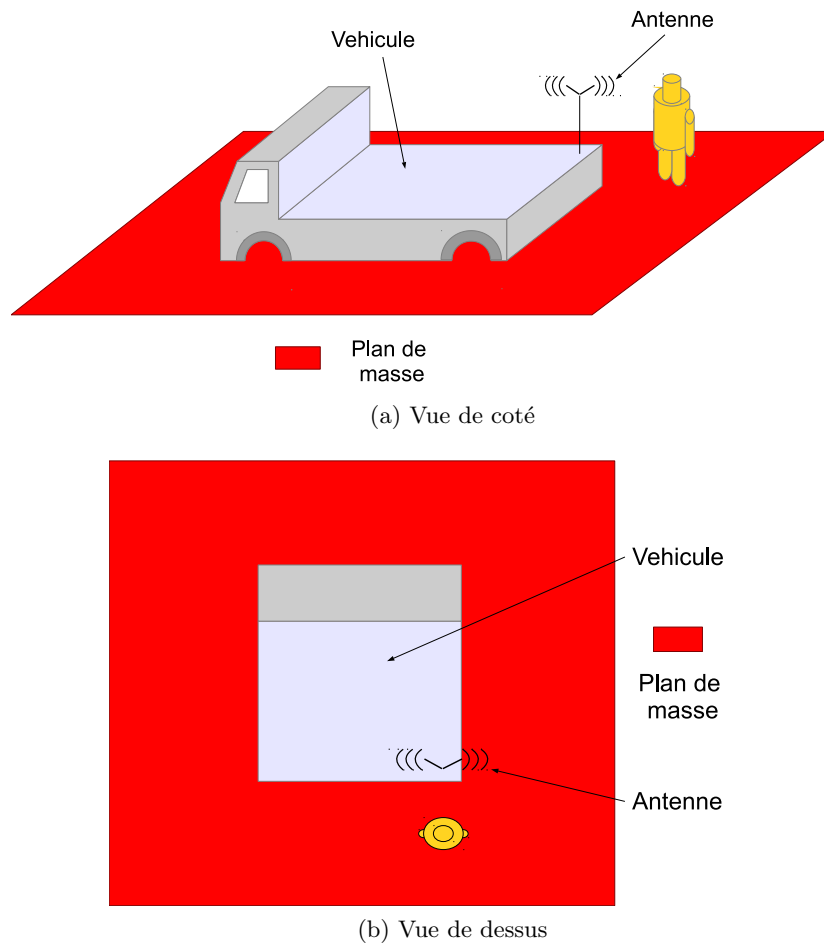


FIGURE 1.4 – Scénario sélectionné sur le thème de la dosimétrie

### 1.3.2 Scénario consacré à l'étude d'une transmission d'antenne

Le second scénario est consacré à l'étude d'une transmission entre deux antennes. La caractérisation du canal est une branche à part entière dans le domaine de la transmission d'information. Élément fondamental dans un système radioélectrique, l'antenne influence directement les performances au niveau de la qualité et de la portée du système. Elle possède plusieurs spécificités dont voici les principales :

- son adaptation à la bande de fréquence souhaitée,
- ses caractéristiques de gain et de rendement,
- son diagramme de rayonnement,

- sa polarisation.

L'obtention de ces caractéristiques s'effectue par la mesure dans des chambres spécifiques (anéchoïde ou réverbérante) ou par le biais de la modélisation numérique. Cette dernière est souvent préférée en amont d'une étude ou projet car elle représente une solution moins coûteuse et plus rapide à mettre en oeuvre. La mesure en pratique se fait en dernière instance en vue de valider les simulations car elle nécessite la mobilisation de nombreuses ressources (matériel, technicien, etc).

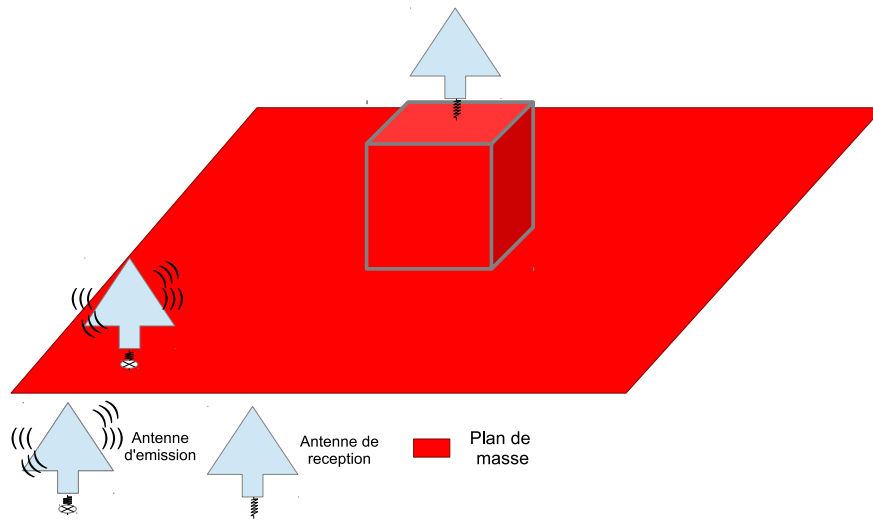
Pour illustrer ce deuxième contexte, un scénario schématisé par la figure 1.5 propose d'étudier la transmission entre deux antennes. L'étude fait intervenir des antennes ULB<sup>5</sup> communément nommées antennes diamants [12, 3]. Les antennes employées dans cette étude possèdent une structure géométrique complexe. De surcroît, il est important de modéliser finement les côtés obliques de façon à garantir une bonne évaluation des performances de l'antenne. Toutefois, la scène analysée possède une longueur et une largeur grandes ce qui crée un fort contraste d'échelle; le contexte multi-échelle est donc présent. Pour finir, la proximité d'éléments diffractants dans l'environnement ainsi que la distance entre l'émetteur et le récepteur sont des données à intégrer dans une étude de caractérisation. Il est donc également nécessaire de varier la position de l'antenne de réception dans l'espace, ce qui introduit la variabilité dans notre scénario.

## 1.4 Vue d'ensemble des différentes méthodes de calcul électromagnétique numériques applicables aux problèmes multi-échelles et variables

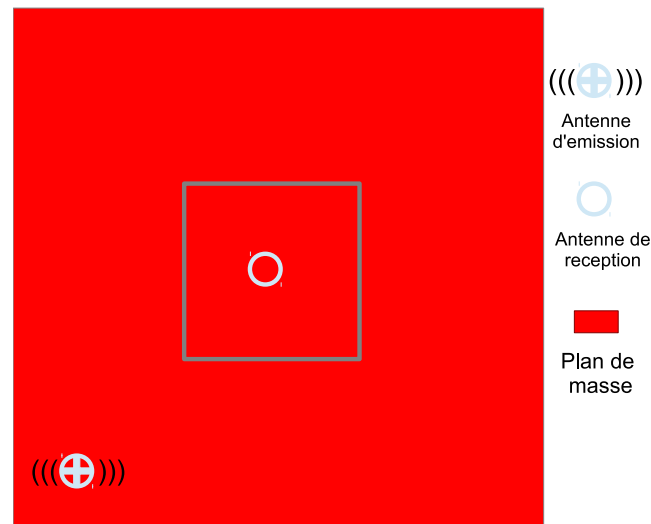
Cette section traite des méthodes numériques pouvant répondre aux deux aspects de notre problématique. Dans un premier temps, un aperçu des outils numériques dédiés à la résolution rigoureuse de problèmes complexes est détaillé. Ensuite, pour chacun des aspects abordés, une liste de solutions est proposée ainsi qu'un inventaire des avantages et des inconvénients. L'objectif de ces méthodes est de trouver un compromis entre précision de calcul et res-

---

5. Ultra-Large Bande



(a) Vue de côté



(b) Vue de dessus

FIGURE 1.5 – Scénario sélectionné sur le thème de la transmission d'antenne

sources informatiques nécessaires au calcul.

Dans un problème de dosimétrie, il convient de modéliser un corps humain dans toute sa complexité. De plus, une étude sur les antennes possédant une géométrie complexe et utilisées dans une application large bande exige l'emploi d'outils numériques spécifiques. C'est pourquoi nous nous focaliserons dans un premier temps sur les méthodes 3D temporelles les plus adaptées à la



problématique.

#### 1.4.1 Les méthodes 3D temporelles

Les méthodes présentées dans cette section correspondent aux méthodes classiques utilisées pour simuler dans le domaine temporel et de manière rigoureuse un problème constitué de structures volumiques, hétérogènes et complexes.

##### Les méthodes FIT et TLM

La première méthode traitée dans cet état de l'art correspond à la technique d'intégration finie aussi connue sous le nom de FIT<sup>6</sup>. Elle a été développée par Thomas A. Weiland en 1977 [13]. Elle propose une résolution temporelle des équations de Maxwell présentées sous leur forme intégrale [14]. La FIT modélise sous forme de cellules parallélépipédiques le problème électromagnétique traité.

La seconde méthode abordée correspond à la méthode TLM<sup>7</sup> introduite par Johns et Beurle en 1971 [15]. La TLM propose de représenter un problème électromagnétique par un réseau de lignes de transmission interconnectées. Ces connexions définissent “les nœuds” du réseau. La résolution du calcul électromagnétique repose sur une analogie entre les composantes du champ EM avec les composantes courants/tensions qui se propagent sur les lignes de transmission du réseau. Toute variation des paramètres électromagnétiques (permittivité, perméabilité, conductivité) est obtenue par l'ajout de ligne de transmission supplémentaires aux nœuds [16]. Cette caractéristique confère à la TLM une polyvalence lui permettant de modéliser de manière simple et fidèle des structures hétérogènes.

Ces deux méthodes ont permis de caractériser efficacement les performances d'antennes [17, 18, 19]. L'article [20] compare la méthode FIT avec la méthode TLM pour une étude effectuée sur un problème de dosimétrie dans une bande de fréquence HF/VHF. Les auteurs y exposent plusieurs études, ainsi qu'une discussion autour des performances obtenues par ces méthodes. Les résultats montrent que la méthode TLM est particulièrement bien adaptée

---

6. Finite Integral Technique

7. Transmission Line Matrix

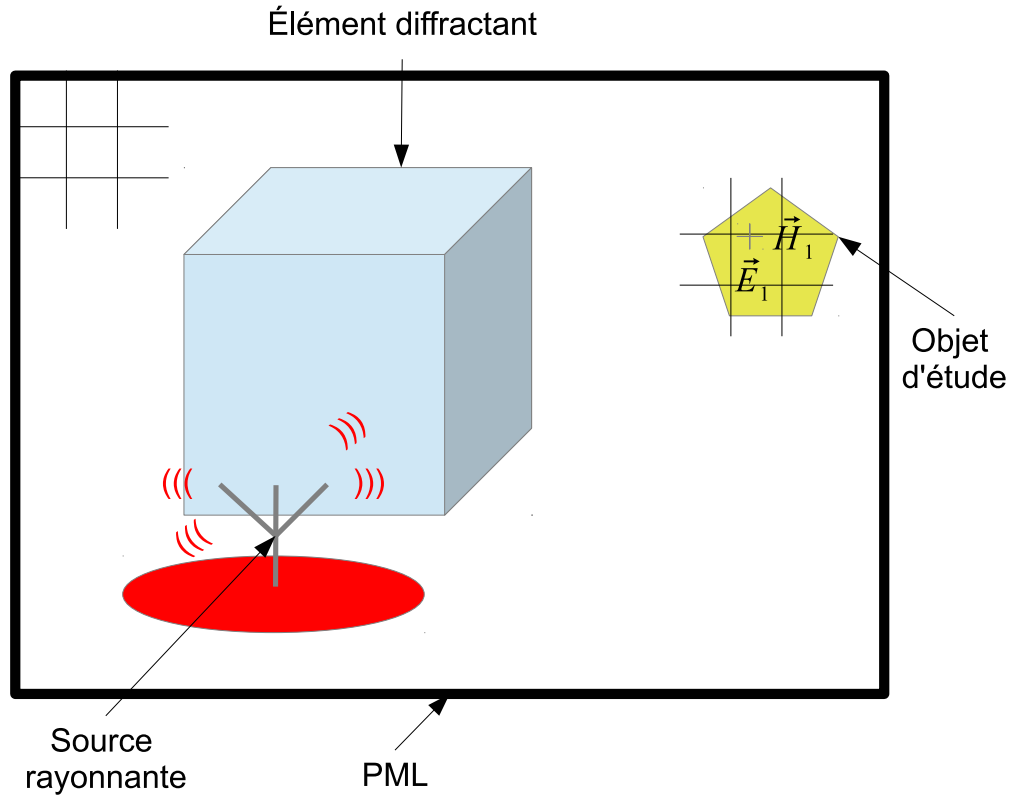


FIGURE 1.6 – Exemple d'application de la FDTD

pour la dosimétrie numérique impliquant des structures très hétérogènes. Cependant, au vu des maillages uniformes qu'imposent les versions basiques de ces techniques, ces deux méthodes sont rapidement limitées pour des calculs de grande taille.

### La méthode FDTD

Une méthode importante à considérer est la méthode des différences finies ou de son acronyme FDTD. Cette méthode se base sur la résolution des équations de Maxwell en régime temporel et sous forme locale. Introduite par les travaux de Yee en 1966 [21], le nom de la méthode et son utilisation ne connaissent un essor qu'en 1980 [22] grâce notamment au développement des super-calculateurs. La FDTD, dans sa forme classique, se caractérise par sa description en maillage rectangulaire et uniforme, qui permet de décrire des éléments de forme complexe et hétérogène (figure 1.6). Ces atouts font de ce

modèle mathématique un outil de choix pour la résolution de différents problèmes [23]. Elle est particulièrement bien adaptée à la modélisation d'objets tridimensionnels et hétérogènes tels que le corps humain, ce qui justifie amplement son utilisation dans le domaine de la dosimétrie numérique.

Dans [4], l'auteur propose d'utiliser la FDTD pour l'étude d'un problème simple d'antenne à proximité d'un matériau possédant les mêmes propriétés que les tissus humains. Les performances de deux types d'antennes élémentaires ont pu être relevées en termes de rayonnement et d'efficacité. Néanmoins selon l'auteur, la FDTD présente clairement des limites lorsqu'il est indispensable de prendre en compte un volume plus grand contenant des éléments plus complexes. En somme, faire des études réalistes nécessite de pouvoir décrire l'ensemble de l'environnement avec un maillage adapté. Ainsi, au vu de son maillage uniforme dans sa forme basique, la demande en ressource informatique qu'exige la FDTD augmente rapidement avec la taille du scénario traité. Cet aspect devient encore plus problématique quand l'objectif est d'estimer le champ électromagnétique dans un contexte multi-échelle. En effet, dans un environnement à grand volume, une description précise d'une certaine zone est essentielle et entraîne un sur-échantillonnage spatial de l'ensemble du volume de calcul, même dans les zones où la description pourrait être très relâchée. C'est pourquoi de nombreuses méthodes issues directement d'une extension de la FDTD ont été proposées. La partie suivante détaille ces aspects.

#### 1.4.2 Méthodes pour la résolution du problème multi-échelle

Afin de répondre à la problématique multi-échelle, nous présentons des approches basées sur les méthodes précédemment évoquées. L'objectif principal pour la plupart d'entre elles est de proposer des stratégies, visant à éviter l'alourdissement inutile des calculs. Elles proposent de varier le maillage en fonction des besoins de précision, ce qui est parfaitement adapté à notre contexte.

##### La MR-FDTD

La MR-FDTD, appelée la FDTD à régions multiples [24] propose de simuler un problème électromagnétique contenant des éléments séparés par un milieu homogène en tenant compte des interactions entre eux. Son principe

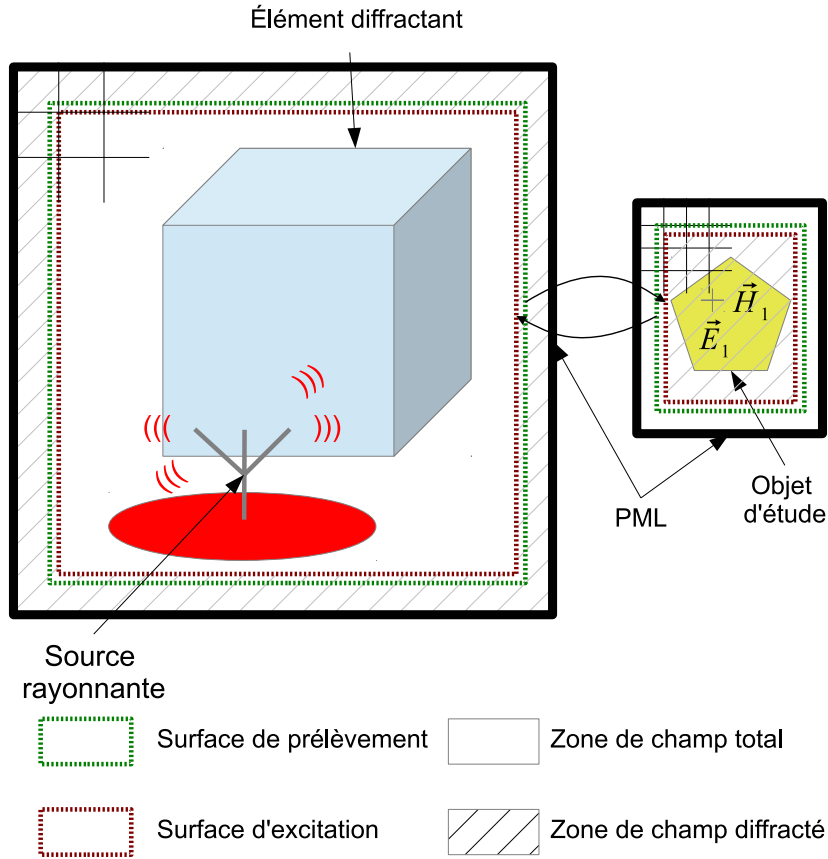


FIGURE 1.7 – Exemple d'application de la MR-FDTD

repose sur la division du volume de calcul en plusieurs sous-volumes FDTD. Chacun d'entre eux décrit un ou plusieurs éléments du problème comme illustré dans la figure 1.7. Chaque sous-domaine possède ses propres paramètres de simulations (maillage, orientation, caractéristiques spatiales et temporelles, conditions absorbantes, etc.). Les champs à l'intérieur de chacun des volumes sont déterminés par la résolution des équations classiques de la FDTD. Une transformation champ proche / champ lointain est calculée grâce aux intégrales de Kirchhoff considérant un milieu homogène et infini. Le lien entre chacun de ces sous volumes se fait par le biais de champs obtenus sur des surfaces de prélèvement, transformés puis injectés vers l'intérieur du volume considéré. Cette technique permet la prise en compte des couplages entre les différents éléments. Cette première extension se différencie d'une simulation FDTD classique par la possibilité de pouvoir mailler chacun des volumes de manière appropriée et d'éviter ainsi de décrire l'espace entre chacun des diffé-

rents éléments d'un problème.

Les avantages de la MR-FDTD comparés à la FDTD classique se manifestent dans des problèmes où les éléments sont suffisamment éloignés entre eux [25]. De plus, la MR-FDTD a été l'objet d'études approfondies notamment celles d'Alexandre Laisné [2, 26, 27] qui ont permis de fournir des techniques de calcul permettant à la MR-FDTD d'être encore plus efficace face à la FDTD. Toutefois, cette méthode est difficilement applicable dans un environnement intégrant un canal de propagation complexe. Dans des contextes tels que la dosimétrie ou la transmission entre antennes, les différents éléments composant l'environnement sont souvent proches des sources rayonnantes. De plus, la nécessité de la présence d'un milieu homogène et infini pour la résolution des équations de Kirchhoff limite son utilisation. Le rebouclage nécessaire entre les sous-volumes de la MR-FDTD entraîne la manifestation d'instabilité.

### **Les méthodes de sous maillage et maillage non uniforme**

Introduites par Kunz en 1981 [28], les techniques de sous-maillage proposent de raffiner localement une partie du problème comme l'illustre la figure 1.8. Ainsi, au sein d'un même volume de calcul, il coexiste plusieurs résolutions de maillage différentes. Les composantes de champ dans les différents volumes sont définies de manière classique en utilisant les équations de la FDTD, tandis que les composantes de champ aux interfaces sont déterminées grâce à une interpolation du champ récupéré dans les régions limitrophes. Ces méthodes permettent donc de s'affranchir du problème de maillage uniforme imposé par la FDTD classique. Elles ont permis la réduction considérable des ressources informatiques nécessaires au calcul FDTD.

Une approche similaire aux méthodes de sous-maillage en FDTD a été proposée pour la méthode TLM. Elle suggère aussi de diviser l'ensemble d'un problème électromagnétique en plusieurs sous-volumes TLM à l'intérieur d'un seul et même volume de calcul [29, 30]. Chaque sous-volume possède sa propre résolution. Un maillage plus fin est utilisé pour la description de la zone utile, tandis que le reste du volume est maillé avec une description plus relâchée.

Dans les contextes de dosimétrie et d'antenne, les méthodes de sous-maillage

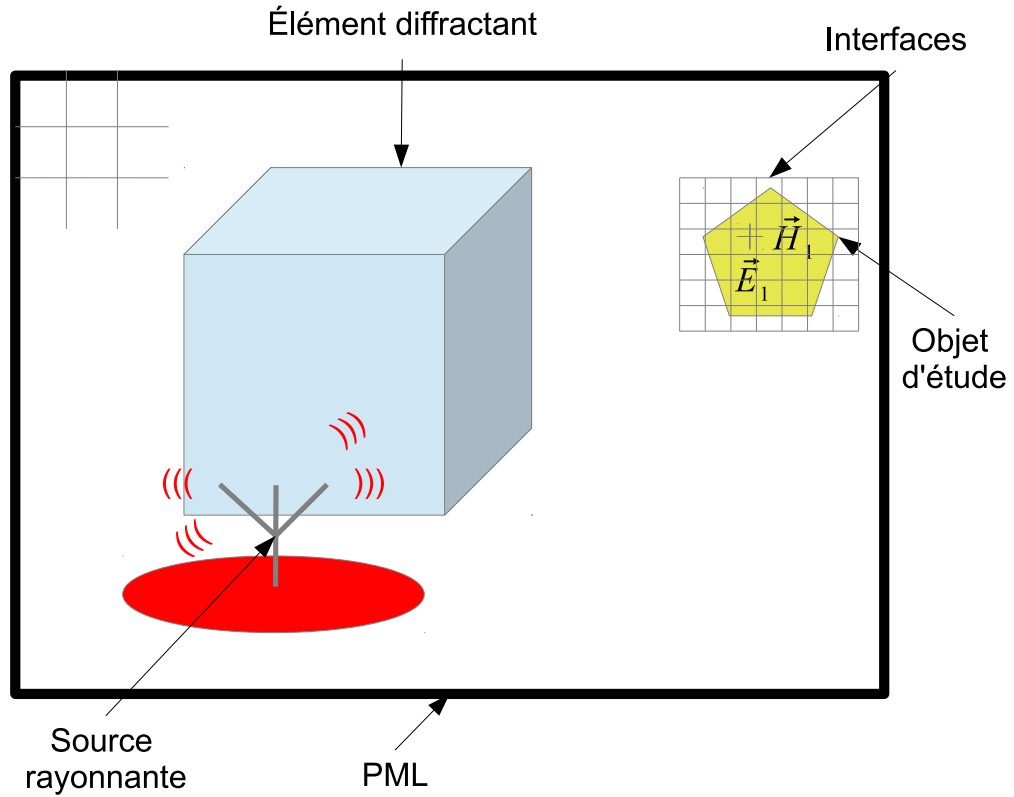


FIGURE 1.8 – Exemple d'application des méthodes de sous-maillage

en FDTD permettent de raffiner la description dans des endroits précis du volume, ce qui permet de représenter plus fidèlement soit un organe, soit une antenne à l'intérieur de son milieu. Cet avantage exploité dans [31, 32, 33] fournit des résultats plus précis en termes de DAS et de rayonnement provoqué par des antennes “off-body” et “in-body” dans un contexte de réseau corporel. Les techniques multirésolutions basées sur la TLM ont fait leurs preuves dans différentes exploitations [34, 35, 36]. Dans [37], l'auteur présente une analyse sur la précision et l'efficacité des différentes approches TLM pour la simulation numérique de cristaux photoniques. Deux catégories de méthode sont utilisées : l'approche utilisant un maillage TLM uniforme et l'approche sous-maillage TLM. Les avantages et les inconvénients pour chacune de ces deux approches sont discutés et une brève comparaison entre ces méthodes est faite. Les résultats de cette étude montrent que l'approche multirésolutions peut réduire considérablement le temps de calcul requis pour la simulation de cristaux photoniques. De plus, elle propose un bon compromis en terme de

précision et de coût de calcul. Malgré ce gain en matière de ressource apporté par les méthodes de sous-maillage, plusieurs inconvénients interviennent lors de son utilisation. Ils se manifestent par la présence d'instabilités dans certains schémas de sous-maillage [38] et d'un rapport d'échelle limité entre les différents domaines [39]. À cela s'ajoute l'apparition de réflexions parasites sur les interfaces à cause de l'existence de différentes résolutions [40]. Pour finir, la présence de ces mêmes interfaces empêche de décrire des matériaux hétérogènes les traversant [41]. Néanmoins, les méthodes de sous-maillage sont sujettes à l'amélioration en réduisant notamment les réflexions parasites et offrant plus de stabilité [42].

Une autre approche reprenant l'idée générale de la méthode de sous-maillage FDTD a été développée sous le nom de non-uniforme FDTD meshing [43, 44]. De manière similaire, elle propose de mailler finement l'objet d'étude tout en relâchant la résolution dans les zones où il n'est pas nécessaire d'utiliser un tel niveau de description. Dans cette approche, la résolution fine se répercute dans les trois directions du repère cartésien déformant ainsi les mailles du reste du volume. L'usage de cette approche multirésolution offre aussi un gain en ressources informatiques et en temps de calcul [45]. Cependant, l'inconvénient majeur réside dans la répercussion du maillage fin dans des zones du volume où cela n'est pas nécessaire. De plus, certaines zones présentent des mailles allongées rendant difficile la résolution des équations de la FDTD. Pour palier cette difficulté, il convient de mettre en œuvre des techniques d'interpolation plus complexes. Le gain apporté par cette technique est donc limité par sa complexité de mise en œuvre.

### **Méthode multirésolution séquentielle basée sur la TLM**

Une autre extension basée sur l'utilisation de la méthode TLM propose de traiter le problème en sous-volumes analysés de manière rigoureuse et séquentielle [46]. Grâce à l'utilisation du principe des diakoptics [47], une surface de Johns est d'abord paramétrée autour de la zone souhaitée. Le sous-volume délimité par cette surface est retiré et le reste de l'environnement est décrit via une description relâchée. Le transfert de l'information électromagnétique est assuré par la récupération d'information sur la surface de Johns afin d'alimenter une matrice appelée "matrice de Johns". Les informations recueillies

lors de cette première étape sont injectées par produit de convolution au niveau des nœuds de la seconde simulation. Cette simulation est lancée avec une résolution fine permettant de décrire l'objet d'étude de façon plus adéquate. Le stockage de la matrice de Johns ainsi que les calculs de produits de convolution peuvent être optimisés par diverses procédures telles que les polynômes de Laguerre [48] dans le but de réduire leurs coûts d'un point de vue du temps de calcul ou de mémoire.

L'article [46] donne un exemple d'utilisation de cette approche. L'auteur propose d'utiliser la résolution séquentielle basée sur les diakoptics pour la modélisation de cavités, de guides d'ondes planaires et des structures diffractantes. Le calcul du coefficient d'adaptation est effectué. Les résultats en précision et en performance montrent qu'un gain significatif quant aux ressources informatiques et de temps de calcul est apporté par l'emploi de cette méthode. Cependant, les limites observées pour cette méthode de sous-maillage est la précision de l'approximation des réponses temporelles par Laguerre.

### **La DG-FDTD et ses extensions**

La DG-FDTD, ou la FDTD à grilles duales, développée par R. Pascaud [3], est assimilée à une extension de la FDTD associée au principe d'équivalence [49, 50]. Elle offre la possibilité d'évaluer précisément le rayonnement électromagnétique d'une source en présence de son environnement en tenant compte grossièrement des couplages entre les différents éléments du volume. Son principe détaillé de manière succincte dans le chapitre suivant a été l'objet d'une étude approfondie dans la thèse de Céline Miry [4]. La méthode DG-FDTD consiste à décomposer un calcul FDTD en plusieurs étapes simulées séquentiellement. Chaque étape met en jeu un volume FDTD avec sa résolution propre et propose la possibilité de zoom sur un endroit précis de l'environnement comme l'illustre la figure 1.9. Ses déclinaisons, DG-FDTD multiniveau et DG-FDTD bilatérale, proposent différentes manières d'aborder un problème.

Ces outils ont fait leur preuve pour traiter différents problèmes touchant des domaines comme la dosimétrie [51] ou la simulation d'antenne [52, 53]. Les résultats et conclusions obtenus dans ces études relèvent un gain en ressources informatiques. Leur utilisation dans le domaine temporel et leur capacité à



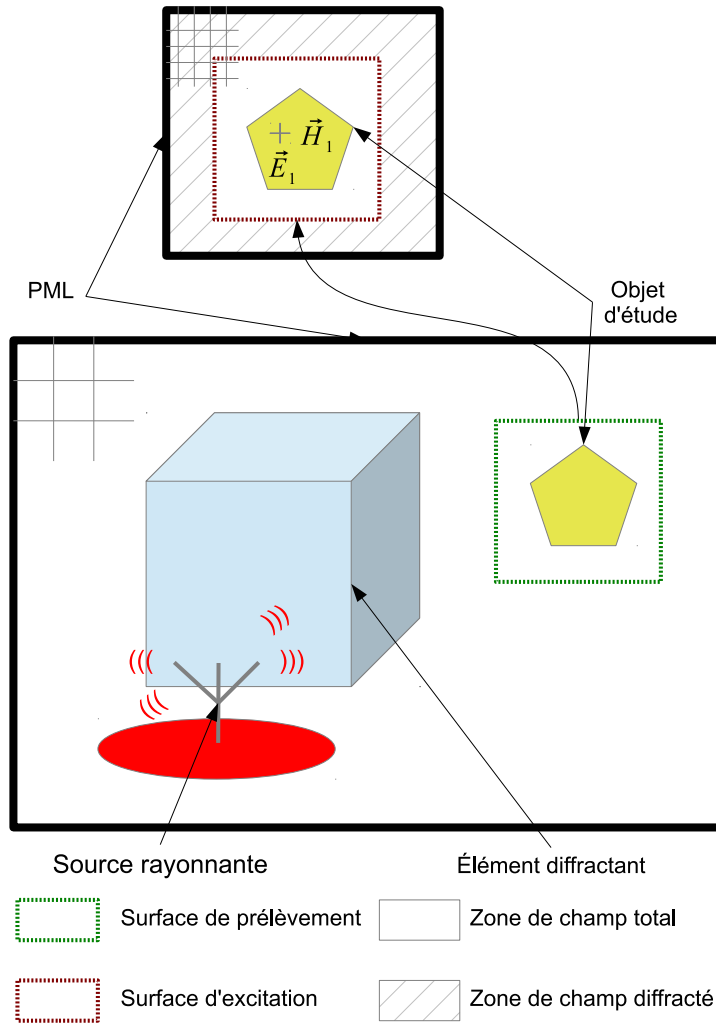


FIGURE 1.9 – Exemple d'application de la méthode DG-FDTD

transférer l'information électromagnétique de manière adéquate offrent plus de robustesse par rapport aux techniques de sous-maillage. Ils garantissent l'étude précise d'objets hétérogènes dans des environnements complexes et de grande taille. Dans [54], l'auteur propose une exploitation de la DG-FDTD dans le contexte des Body Area Networks. La méthode est employée afin d'étudier efficacement la transmission entre une antenne implantée dans un modèle simplifié de corps humain et une antenne externe dans une grande pièce. L'approche multirésolution de la DG-FDTD est d'abord utilisée pour décrire finement l'antenne d'émission. Les étapes suivantes utilisant une description de plus en plus relâchée sont utilisées pour décrire l'ensemble du corps

humain ainsi que la pièce. Les conclusions nous montrent que la DG-FDTD multiniveau donne des résultats, en termes de coefficient de transmission, plus rapidement qu'une simulation classique FDTD, tout en offrant une bonne précision.

### Conclusion partielle pour la résolution du problème multi-échelle

Au vu de toutes les méthodes énoncées dans cette première partie de l'état de l'art, un bilan sur les méthodes candidates à la résolution de la problématique multi-échelle peut être fait. Dans un premier temps, la méthode nommée MR-FDTD montre ses qualités pour l'étude du comportement électrique d'éléments éloignés. Cependant, son application dans un contexte comme la dosimétrie rend son usage difficile. Ensuite, les méthodes de sous-maillage (uniforme ou non-uniforme) sont présentées. Leur capacité à choisir plusieurs résolutions au sein d'un même volume de calcul donne un gain significatif en ressources informatiques et en temps de calcul. Malheureusement, l'emploi de telles méthodes s'accompagne d'inconvénients nuisibles à la résolution de problèmes électromagnétiques. Pour finir, les méthodes de résolution séquentielle sont exposées. La résolution d'un problème électromagnétique s'effectue en étapes possédant chacune ses propres résolutions. Elles offrent donc la capacité de se focaliser sur une zone précise de l'environnement tout en apportant précision et stabilité. Ainsi, notre choix se porte sur la DG-FDTD et ses capacités de zoom électromagnétique.

#### 1.4.3 Méthodes pour la résolution du problème variable

Afin de pouvoir aborder cette contrainte de manière efficace, différentes approches ont été développées. En vue d'orienter notre choix de méthode, il est nécessaire d'identifier clairement nos besoins. Le problème considéré propose de connaître l'influence de la position  $(x_i; y_i; z_i)$  sur les champs  $(\vec{E}_i; \vec{H}_i)$  en un point à l'intérieur de l'objet d'étude. La figure 1.10 illustre cette problématique. Chaque emplacement de l'objet d'étude dans l'environnement engendre des nouvelles valeurs du champ électromagnétique. Partant de ce constat, le problème peut se formaliser par un modèle mathématique reliant les entrées (positions de l'objet d'étude) aux sorties (champs EM à l'intérieur de l'objet d'étude). Ce modèle doit fournir les sorties de manière rapide et précise. Deux catégories de méthode peuvent satisfaire ces exigences :

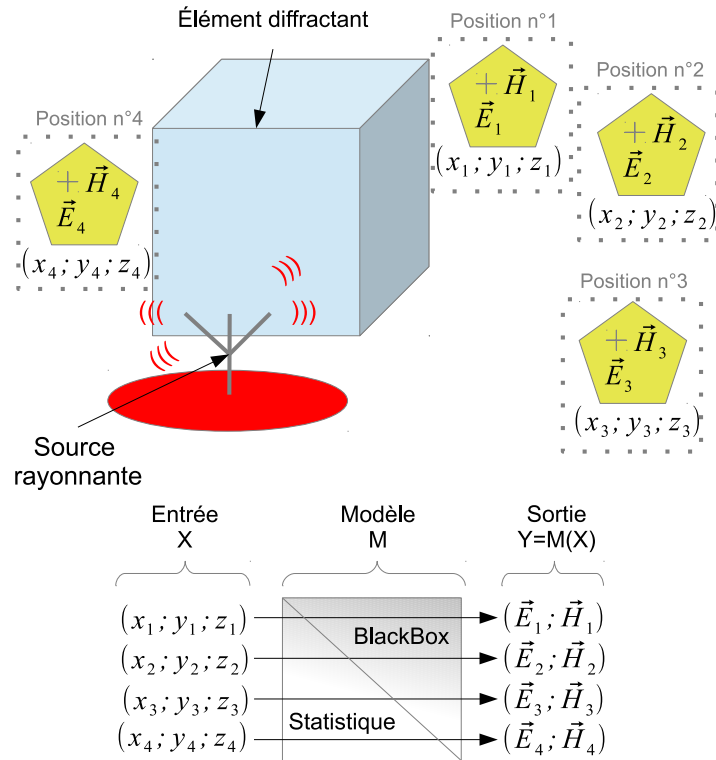


FIGURE 1.10 – Application d'un modèle mathématique pour traiter le problème variable

- les approches stochastiques,
- les approches basées sur la construction d'un modèle de substitution (blackbox).

#### 1.4.3.1 Approche stochastique

Dans un problème physique, il est souvent utile de représenter des observations en fonction d'entrées bien connues. En règle générale, ces observations se présentent de manière non-linéaire. L'utilisation d'une approche stochastique vise à fournir un lien entre les variables d'entrée et les observables (terme générique utilisé par les statisticiens pour définir les sorties). Dans ce genre d'approche, les entrées et les observables sont considérées comme des variables aléatoires. L'objectif du modèle stochastique sera de déterminer les lois de probabilité des observables à partir de celles des entrées.

### Simulation de Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo (MC) désigne toute méthode visant à calculer une valeur numérique en utilisant des procédés aléatoires ou des techniques probabilistes. Elle a été introduite en 1947 par Nicholas Metropolis [55] et publiée pour la première fois lors d'un article paru en 1949 [56]. Une application de la méthode MC dans notre problème consiste à lancer une simulation numérique pour toutes les positions de l'objet d'étude dans l'espace. Les résultats pour chaque configuration sont répertoriés afin d'établir la loi de probabilité liant la valeurs des champs EM en fonction de la position. Souvent utilisée comme référence lors d'étude en variabilité, cette approche apporte souplesse et précision.

Dans [57], l'auteur propose l'utilisation d'une simulation de Monte Carlo afin d'étudier l'impact de lumières dont les longueurs d'onde sont comprises entre 600 et 1000 nm sur des tissus humains pour le traitement de cancer de la peau (traitement photothérapie dynamique). La simulation de Monte Carlo démontre qu'il existe une relation entre pénétration des ondes et les propriétés des tissus. L'avantage de ce procédé réside dans sa possibilité de simuler toutes les configurations possibles, sans se soucier de la complexité du modèle ou de la géométrie de la source. Tous les résultats sont récupérés, ce qui permet de faire la meilleure conjecture possible. Cependant, l'étude a été très simplifiée notamment sur le choix des paramètres (variables d'entrée). L'auteur a volontairement limité ce choix et stipule clairement que le temps d'étude augmente rapidement avec le nombre de paramètres considérés. Ces conclusions se retrouvent dans des études portant sur la transmission d'antenne [58, 59]. Il apparait clairement que l'usage d'une telle approche dans notre contexte serait trop coûteuse en temps de calcul.

### Collocation stochastique

Les collocations stochastiques (CS) sont des méthodes probabilistes employées en variabilité afin de déterminer la moyenne et la variance de l'observable. Cette méthode prend en compte des incertitudes en mesurant l'impact de différents aléas d'entrée (ou variables aléatoires) sur les observables de sorties. À la différence des méthodes de Monte Carlo, cette approche consiste à res-

treindre l'étude aux entrées les plus influentes sur les observables. Le nombre de simulations numériques requis est donc réduit tout en conservant un résultat précis, simple et efficace. Cette approche permet une convergence des résultats beaucoup plus rapide que la méthode de simulation de Monte Carlo. Cependant, son efficacité dépend du nombre de variables aléatoires présent en entrée. Elle diminue lorsque celui-ci augmente. De surcroît, il est important de les identifier efficacement en ne gardant que celles qui ont le plus d'influence sur la sortie.

Dans l'étude proposée dans [60], les méthodes de collocation stochastique sont utilisées afin de déterminer l'influence de l'angle d'incidence d'une onde lors du calcul du DAS sur un tissu humain. Une onde plane de fréquence 900 MHz, vient éclairer un modèle homogène d'une tête provenant du fantôme SAM<sup>8</sup>. Les variables d'entrée du modèle correspondent à deux angles de propagation de l'onde tandis que les sorties correspondent à la moyenne et la variance du DAS 10 g. Le DAS est obtenu grâce à la FDTD et une analyse de sensibilité globale est ainsi proposée. Ces méthodes ont deux avantages : elles sont non intrusives et ne modifient pas la méthode numérique utilisée. En outre, elles sont faciles à mettre en place. Néanmoins, la CS ne propose que la moyenne et la variance de l'observable, ce qui est insuffisant pour notre cas de figure. En effet, nous souhaitons obtenir la valeur précise du champ en un point précis de l'espace. Et comme toute approche statistique, elle nécessite la multiplication de simulations numériques afin de pouvoir récupérer les informations nécessaires à sa mise en place.

### Chaos Polynomial

Le chaos polynomial (CP) est une technique statistique introduite par Wiener en 1938 et utilisée pour l'étude de la variabilité d'un observable. Tout comme les méthodes CS, le nombre de simulations numériques est réduit aux entrées les plus influentes. Cependant, la particularité du CP réside dans sa capacité à fournir la densité de probabilité (PDF<sup>9</sup>) de la sortie et à offrir une analyse approfondie, dite "analyse de sensibilité", afin de hiérarchiser l'influence des paramètres d'entrées sur la variabilité de la sortie [61] .

---

8. Spécifique Anthropomorphique Mannequin

9. Probability Density Function

Le chaos polynomial a fait ses preuves en dosimétrie numérique pour la caractérisation de l'exposition d'un modèle de tête humaine en présence d'un téléphone portable [62]. L'auteur propose la construction d'un modèle statistique basée sur la CP pouvant calculer le DAS sous différents angles d'inclinaison du téléphone. Les distributions statistiques du DAS 10g et du DAS 1g dans le cerveau sont déterminées grâce à des simulations FDTD dans différentes configurations. Cet article présente des résultats sur la précision du DAS en comparant ceux obtenus par la FDTD et ceux obtenus par le CP. Leur précision dépend principalement du nombre de point de configuration sélectionné en entrée. Une erreur de moins d'1% est obtenue à partir de 50 configurations soit 50 simulations FDTD à lancer. L'avantage de cette approche est qu'elle propose une méthode offrant un résultat rapide et précis. Cependant, cette précision est dépendante du nombre de simulations lancées. Cette multiplication de simulations est donc toujours un frein pour la résolution de notre problème.

## Conclusion

Ainsi, malgré tous les progrès effectués, aussi bien sur le plan de l'optimisation des modèles mathématiques que sur le plan de l'évolution informatique (vitesse des machines), les méthodes statistiques ont pour inconvénient commun de se heurter à un problème de temps de calcul. En effet, la récolte d'informations indispensables à l'application d'une telle approche nécessite de réaliser un grand nombre de simulations numériques. Il n'est donc pas intéressant d'employer ce genre d'approche quand le calcul électromagnétique d'une configuration requiert un temps de calcul très important.

### 1.4.3.2 Approche basée sur la construction d'un modèle de substitution

Cette approche est basée sur la construction d'un macromodèle afin de fournir un résultat rapide tout en conservant une précision intéressante. Une fois construit, le modèle de substitution vise à remplacer la simulation numérique et ainsi à s'affranchir de ce temps de calcul. Les simulations numériques sont vues comme une fonction analytique :

$$[\vec{E}_i; \vec{H}_i] = f([x_i; y_i; z_i]) \quad (1.1)$$

avec  $x_i, y_i$  et  $z_i$  les entrées de notre système et  $\vec{E}_i$  et  $\vec{H}_i$  les sorties.

Cette modélisation peut être assimilée à une boîte noire possédant un ensemble d'entrées et de sorties. Ainsi, pour toute nouvelle série d'entrée, le macromodèle donne rapidement des résultats en sortie ce qui permet de réduire sensiblement les temps de calcul dans une étude impliquant un problème variable. Les principaux avantages de l'utilisation des métamodélisations se situent dans leur capacité à être exploitables sur une grande variété de problème physique. Ils peuvent donc être facilement réutilisés dans divers contextes et touchent une large communauté scientifique. De plus, cette modélisation se fait par une fonction analytique rapide à évaluer et elle s'intègre facilement à une chaîne de calcul. Cependant, ces modèles présentent un inconvénient majeur qui réside dans la perte d'interprétation physique.

Au vu de la multitude de macromodèles à disposition, un choix sur le modèle le plus adapté à notre situation est à faire. Une liste non exhaustive des modèles de substitution les plus utilisés peut être faite, on y trouve :

- les réseaux de type neurone ou MLP<sup>10</sup> [63],
- les réseaux de type RBF<sup>11</sup> [64],
- les machines à vecteurs de support ou séparateurs à vaste marge, dites SVR<sup>12</sup> [65].

L'utilisation d'un de ces modèles implique la mise en place de toute une procédure d'application à suivre de manière méthodique.

## Réseau de neurones artificiel

En premier lieu, il est intéressant d'énumérer les macromodèles basés sur le principe des réseaux de neurones artificiels (RNA) [66]. C'est un outil informatique dont la construction est schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques (figure 1.11). Les RNA s'exécutent en deux phases, la première phase correspond à la phase d'apprentissage, qui produit le réseau artificiel tandis que la seconde correspond à la phase d'utilisation. Cette dernière phase étant une phase d'application, toute la difficulté du réseau de neurones réside dans sa construction. Il existe un nombre important de type de réseaux de neurones. Leurs distinctions se situent dans le type et l'algorithme

---

10. Multi-Layer Perceptron

11. Radial Basis Functions

12. Support Vector Machine

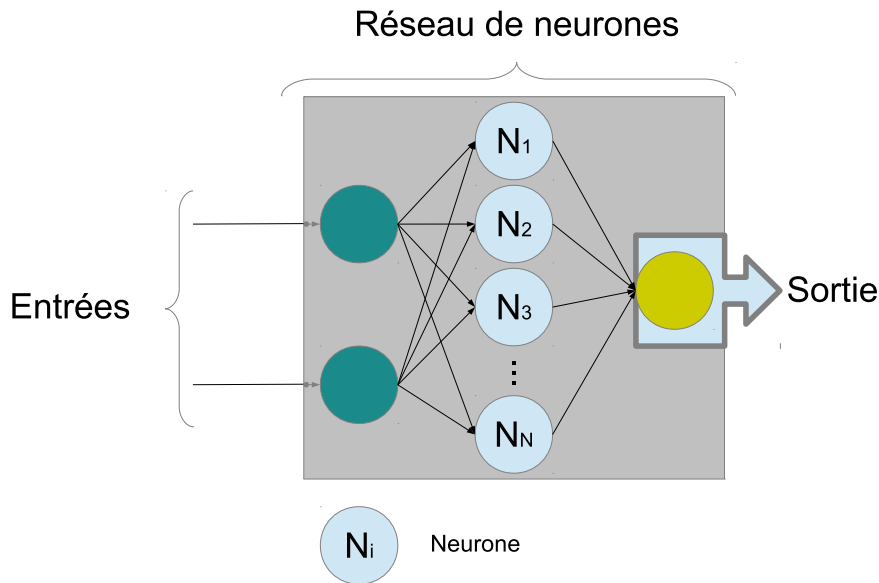


FIGURE 1.11 – Conception schématique du réseau de neurones

utilisé pour l'apprentissage, l'architecture ou encore la connectivité entre les différents neurones.

Plusieurs articles se consacrent à l'utilisation de RNA en dosimétrie [67, 68]. Dans [69], l'auteur utilise les RNA afin d'estimer la dose de radiation provoquée par un faisceau d'onde sur des tissus homogènes et hétérogènes en radiothérapie. Un algorithme d'évaluation des doses a été réalisé en fonction de la distance de ce faisceau et de la profondeur du tissu. Les résultats montrent que ce modèle fournit une évaluation rapide et précise d'un dépôt de dose lors d'une irradiation. Ils ont été obtenus grâce à un modèle RNA basé sur un algorithme d'apprentissage incrémental et parallèle pouvant être déployé de manière efficace sur une grappe de calcul. L'auteur souligne la capacité du RNA à réaliser une approximation d'une fonction d'entrée-sortie non linéaire.

Plusieurs extensions du RNA ont été développées comme le EANN (Evolutionary Artificial Neural Networks) [70] ou bien le NSDANN (Neutron Spectrometry and Dosimetry by means of Artificial Neural Networks) [71]. Ces outils apportent plus de fiabilité et augmentent l'efficacité du RNA en améliorant la collecte des données lors de la phase d'apprentissage. Néanmoins, l'inconvénient majeur de ce genre de macromodèle réside dans sa nécessité de multiplier



les expériences dans sa phase d'apprentissage. Le temps de construction du réseau est donc proportionnel au temps de calcul de la simulation électromagnétique du problème à modéliser. Ainsi, dans notre contexte d'étude où une simulation possède un temps de calcul conséquent, la construction d'un RNA nécessite un investissement en temps considérable.

### Le macromodèle basé sur l'utilisation du théorème de réciprocité

Un modèle de substitution récent propose de concevoir un algorithme liant les entrées et la sortie d'un problème électromagnétique en utilisant le théorème de réciprocité de Lorentz [50]. Introduit par l'article [72], ce macromodèle considère une simulation numérique comme un système linéaire. Ainsi, dans le domaine fréquentiel, la sortie est obtenue grâce à la somme des multiplications des entrées avec des fonctions de transfert comme le montre la figure 1.12. La particularité de ce modèle réside dans sa capacité à être construit avec très peu de simulations électromagnétiques.

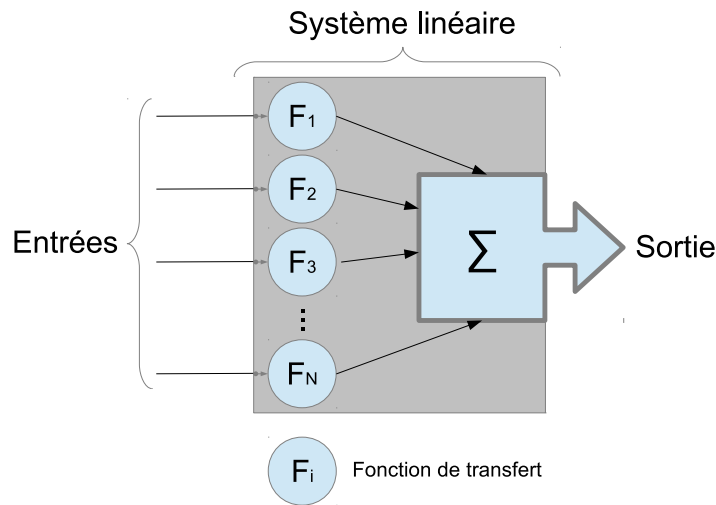


FIGURE 1.12 – Conception schématique du macromodèle basé sur le théorème de réciprocité

Dans ce même article [72], l'outil est utilisé afin de caractériser la transmission entre antennes dans un canal de propagation en remplaçant l'antenne de réception par le macromodèle. L'usage de cette méthode est découpé en deux étapes. La première consiste à construire le modèle de substitution à

partir de simulations FDTD afin de calculer les fonctions de transfert. Ce modèle vise à fournir en sortie le champ électrique aux bornes du dipôle de l'antenne de réception. La seconde étape consiste à insérer le modèle construit à la suite d'une simulation FDTD décrivant l'environnement dans laquelle est située l'antenne d'émission. Les champs électromagnétiques provenant de cette antenne sont récupérés en entrée du modèle afin de fournir de manière rapide et rigoureuse la sortie. Appliqué dans une simulation 2D, l'auteur compare les performances de son modèle avec une utilisation classique de la FDTD et de la DG-FDTD. Les résultats montrent que son emploi apporte des résultats rapides, précis et rigoureux. Néanmoins, l'approche ne prend pas en compte le couplage de l'antenne de réception avec son environnement. Finalement, il est nécessaire de signaler que le principe de ce modèle ne fonctionne que si les éléments substitués possèdent un comportement passif et linéaire. Les tissus humains et les antennes possèdent cette propriété, cette contrainte n'est pas limitative pour nos applications.

### **Conclusion partielle pour la résolution du problème variable**

Afin de conclure cette partie, un bilan des méthodes pouvant traiter la problématique variable peut être proposé. Dans un premier temps, les méthodes stochastiques ont été présentées. Elles ont la particularité de relier par une loi de probabilité les données d'entrée et de sortie d'un système. Le problème majeur de ces méthodes réside dans la nécessité de multiplier les simulations numériques afin de les mettre en application. Dans un second temps, les approches basées sur la construction d'un modèle de substitution proposent de remplacer la simulation électromagnétique par un macromodèle. Les macromodèles sont faciles à intégrer à la suite d'un calcul électromagnétique et possèdent la faculté de se construire rapidement. En conclusion de cette partie, le choix pour traiter le problème variable se porte sur la construction d'un modèle de substitution basé sur le théorème de réciprocité.

## **1.5 Conclusion**

Ce chapitre a permis de définir le contexte applicatif de la thèse. La définition des notions importantes de la problématique et une description précise des scénarios ont été faites. Plusieurs méthodes et approches pour le calcul

électromagnétique ont été présentées. Leurs avantages et leurs inconvénients pour les contraintes variables et multi-échelles ont été mis en avant, ainsi qu'un bilan pour chacune d'entre elles. Le premier bilan a montré que la méthode FDTD et son extension DG-FDTD semblent être des candidates idéales pour traiter des problèmes multi-échelles mettant en scène des tissus humains ou des structures métalliques complexes. Même si l'existence de travaux et de codes sources au sein du laboratoire ont orienté ce choix de méthode, cette dernière présente de bonnes caractéristiques pour modéliser les structures complexes et hétérogènes. Le second bilan a montré que l'utilisation d'un modèle de substitution semble être un complément judicieux pour la résolution du problème variable. La combinaison de ces deux procédés est développée dans les chapitres suivants.

## Chapitre 2

# La FDTD et ses extensions comme solution à un problème de grande taille

---

2.1	Introduction . . . . .	<b>33</b>
2.2	La méthode FDTD . . . . .	<b>34</b>
2.2.1	Principe . . . . .	34
2.2.2	Contrainte numérique . . . . .	34
2.2.3	Traitements spéciaux, post-traitement et modèles utilisés . . . . .	37
2.2.4	Exploitation de la méthode FDTD : calcul du DAS œil dans Hugo en espace libre . . . . .	41
2.3	La DG-FDTD multiniveau et bilatérale . . . . .	<b>44</b>
2.3.1	Principe de la DG-FDTD multiniveau . . . . .	45
2.3.2	Principe de la DG-FDTD bilatérale . . . . .	47
2.3.3	Exploitation de la DG-FDTD : Calcul du DAS dans Hugo en espace libre . . . . .	48
2.3.4	Conclusion . . . . .	51
2.4	Exploitation : Application de la DG-FDTD dans un scé- nario de dosimétrie fortement multi-échelle . . . . .	<b>51</b>
2.4.1	Présentation du problème . . . . .	51
2.4.2	Configuration de simulation . . . . .	53
2.4.3	Résultats et conclusion . . . . .	54
2.5	Conclusion . . . . .	<b>58</b>

---

## 2.1 Introduction

La méthode des différences finies dans le domaine temporel est une méthode 3D volumique permettant la résolution numérique des équations de Maxwell. Elle a fait l'objet de nombreux articles traitant soit de son application dans divers domaines (caractérisation d'antenne, problématique CEM, problème de surface équivalente radar [73] etc.), soit de son développement pour surmonter ses limitations sous sa forme classique (amélioration de la description des modèles de matériaux complexes et des conditions limites absorbantes [74, 75]). Ses avantages résident dans sa simplicité et sa capacité à traiter rigoureusement des structures hétérogènes dans le domaine temporel donc sur une large bande de fréquence. Cependant, le maillage uniforme qu'impose une utilisation classique de la FDTD constitue son principal inconvénient. La description de petits détails dans un grand volume de calcul peut entraîner un maillage inutilement fin de certaines zones, ce qui entraîne une augmentation des ressources informatiques et du temps de calcul.

Répondant directement à la volonté de surmonter le problème de maillage uniforme, des méthodes avancées en FDTD ont été proposées. La DG-FDTD, dans son principe général, propose la résolution d'un problème électromagnétique par sa décomposition en plusieurs niveaux de résolution. Plusieurs simulations FDTD sont lancées séquentiellement. Le transfert de l'information électromagnétique se fait par le biais d'une surface de prélèvement puis d'une surface d'injection.

Ce chapitre introduit la FDTD, ses contraintes et ses traitements spéciaux. Un exemple d'exploitation de cette méthode dans un contexte de dosimétrie est donné. Ensuite, le principe de la DG-FDTD et ses extensions à savoir la DG-FDTD multiniveau et bilatérale sont présentés. En guise d'illustration, une application de la DG-FDTD est proposée dans un cas canonique. Pour finir, ce chapitre se termine sur la résolution d'un scénario multi-échelle. Une présentation du scénario et un exemple d'application de la méthode DG-FDTD sont détaillés. Une discussion autour des résultats et performances est par la suite proposée.

## 2.2 La méthode FDTD

### 2.2.1 Principe

La méthode FDTD a pour but principal de modéliser la propagation des champs électromagnétiques dans un volume de l'espace. Elle repose sur un algorithme numérique basé sur la résolution des équations de Maxwell dans le domaine temporel. Cette méthode propose la division du volume de calcul en cellules parallélépipédiques suivant un formalisme proposé par Yee [21] comme l'illustre la figure 2.1. Les champs électriques et magnétiques sont ainsi localisés suivant une configuration bien précise dans l'espace, et déterminés pour chaque itération temporelle. Grâce à l'utilisation du principe des différences finies centrées, les équations de Maxwell sont converties en six équations de mise à jour pour les six composantes de champ, comme explicité dans l'annexe A. Les phénomènes électromagnétiques régis par ces équations ne peuvent être décrits correctement que par un choix judicieux au niveau des paramètres de discrétisation.

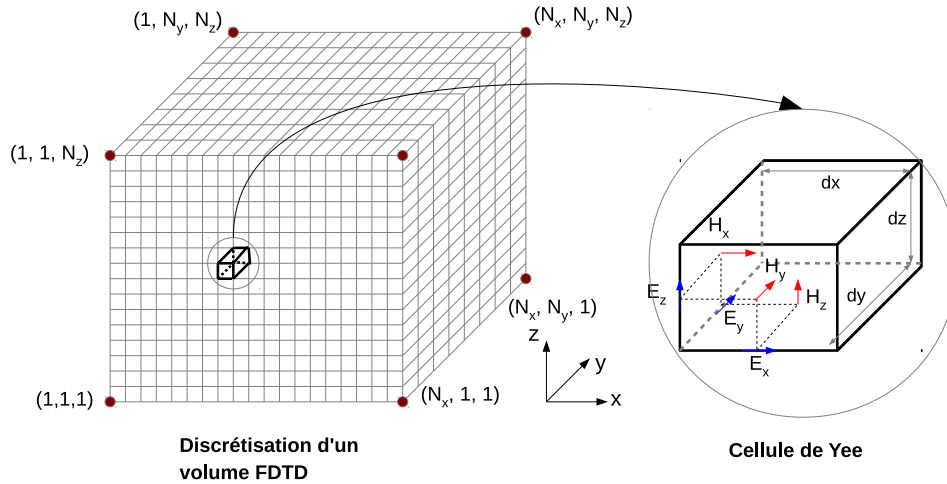


FIGURE 2.1 – Division en cellules de Yee d'un volume de calcul FDTD.

### 2.2.2 Contrainte numérique

L'utilisation de la méthode FDTD impose un choix précis aux niveaux de la résolution du maillage spatial ( $dx$ ,  $dy$  et  $dz$ ) et des paramètres d'échantillonnage temporel ( $dt$ ). Dans ce paragraphe, trois contraintes principales

sont exposées.

### 2.2.2.1 Contrainte géométrique

La première contrainte correspond à la géométrie du problème considéré. Dans le souci d'une description fidèle des différents objets présents dans le volume de calcul, le choix du maillage est dicté par la représentation des plus petites structures. De plus, en raison du décalage d'une demi-cellule entre les champs électriques et magnétiques, une incertitude sur les dimensions réelles des éléments modélisés est présente. Enfin, l'utilisation d'une grille composée uniquement de cellules parallélépipédiques pose certaines difficultés, notamment pour la représentation de structures cylindriques ou de forme oblique. Le recours à un maillage fin permet de palier ces inconvénients d'un point de vue géométrique mais impose un plus grand nombre de cellules FDTD, ce qui entraîne la mobilisation de plus de ressources informatiques et de temps de calcul (cf figure 2.2).

### 2.2.2.2 Contrainte de dispersion

La seconde contrainte correspond à la contrainte de dispersion numérique qui conditionne les pas d'échantillonnage spatial  $dx$ ,  $dy$  et  $dz$ . Conséquence directe de la discrétisation spatiale et de l'emploi des approximations par différences finies, ce phénomène se traduit par la modification de la forme du signal et l'atténuation de l'onde [73]. Dans le but de limiter cette dispersion, les pas d'échantillonnage doivent respecter :

$$dx, dy, dz \leq \frac{\lambda_{min}}{10} \quad (2.1)$$

où  $\lambda_{min}$  représente la plus petite longueur d'onde susceptible de se propager dans le volume, c'est-à-dire la longueur d'onde dans le diélectrique de plus forte permittivité  $\epsilon_r$  à la fréquence maximale de simulation  $f_{max}$  :

$$\lambda_{min} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f_{max}} \quad (2.2)$$

Le choix des paramètres d'échantillonnage spatial résulte donc d'un compromis entre minimisation des approximations géométriques, réduction de la dispersion mais également limitation des ressources informatiques nécessaires au calcul.

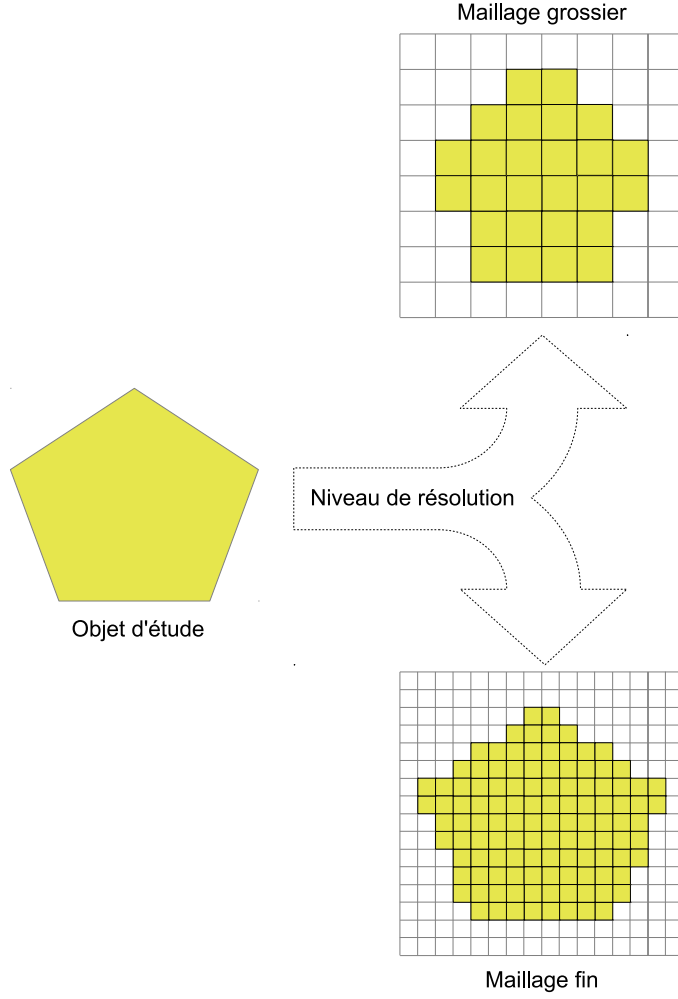


FIGURE 2.2 – Contrainte géométrique en FDTD.

### 2.2.2.3 Contrainte de stabilité

La troisième et dernière contrainte conditionne le pas d'échantillonnage temporel  $dt$ . La stabilité de l'algorithme FDTD est garantie par un choix sur ce pas [76] :

$$dt < \frac{1}{v \sqrt{(\frac{1}{dx})^2 + (\frac{1}{dy})^2 + (\frac{1}{dz})^2}} = dt_{max} \quad (2.3)$$

où  $v$  représente la vitesse maximale de propagation de l'onde dans le volume de calcul. Le choix de  $dt$  a également un impact direct sur la dispersion numérique. Elle augmente quand  $dt$  s'éloigne de sa limite maximale fixée par



l'équation 2.3 [77].

### 2.2.3 Traitements spéciaux, post-traitement et modèles utilisés

Les équations de la FDTD présentées dans l'annexe A ont été développées uniquement dans un milieu libre de sources. Des équations plus spécifiques présentées par divers travaux [4, 3] permettent de prendre en compte des conditions plus complexes de simulation. Elles permettent de considérer différents types d'excitation, d'insérer différents matériaux ou de définir différents types de conditions limites (ABC<sup>1</sup> ou plan de masse). Ce paragraphe traite des notions importantes utilisées dans le cadre de cette thèse et intégrées directement dans l'algorithme de la FDTD.

#### 2.2.3.1 Le dipôle infinitésimal

Le dipôle infinitésimal est un dipôle dont la longueur est significativement petite comparée à la longueur d'onde ( $l < \frac{\lambda}{50}$  [78]). C'est une antenne élémentaire caractérisée par une densité de courant uniforme. Durant notre étude, deux types d'antenne sont utilisés :

- le dipôle infinitésimal électrique,
- le dipôle infinitésimal magnétique.

L'utilisation du premier type comme source d'excitation du volume revient à ajouter un terme de densité de courant électrique au niveau de la composante du champ électrique [79]. Par exemple, dans la cellule  $(i, j, k)$  de dimension  $dx \times dy \times dz$  et à l'itération  $n$ , l'insertion d'un dipôle orienté suivant l'axe  $z$  est prise en compte par l'équation :

$$E_z|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} = (\text{Calcul FDTD}) \quad (2.4)$$

$$+ \frac{\frac{dt}{\epsilon}}{1 + \frac{\sigma dt}{2\epsilon} dx dy} I_e|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$$

avec  $\sigma$  la conductivité du milieu et  $I_e$  la source de courant électrique équivalente.

De façon similaire, l'utilisation d'un dipôle du second type comme source d'excitation du volume revient à ajouter un terme de densité de courant magné-

---

1. Absorbing Boundary Conditions

tique au niveau de la composante du champ magnétique. Un exemple d'excitation suivant l'axe  $z$  dans la même cellule donne :

$$H_z|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} = (\text{Calcul FDTD}) - \frac{dt}{\mu_0 dx dy} I_m|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^n \quad (2.5)$$

avec  $\mu_0$  la permeabilité du vide et  $I_m$  la source de courant magnétique équivalente.

### 2.2.3.2 Calcul des paramètres S

Les paramètres  $S^2$  sont des caractéristiques circuits utilisées dans le domaine des hyperfréquences. Ils fournissent les relations entre ondes incidentes et ondes réfléchies d'un système à plusieurs accès. Dans un système à  $N$  accès, chacune des voies  $k$  est caractérisée par son onde incidente  $a_k$ , son onde réfléchie  $b_k$  et son impédance de normalisation  $Z_{c_k}$ . A l'intérieur d'un volume FDTD, la tension  $V_k$  aux bornes d'une arête, est obtenue en intégrant le champ électrique le long de cette arête. Le courant  $I_k$  se calcule grâce à la circulation du champ magnétique autour de cette même arête. Ainsi, on a :

$$V_k = - \int_l E dl \quad (2.6)$$

$$I_k = \oint_C H dl \quad (2.7)$$

où  $l$  représente la longueur de l'arête considérée et  $C$  le contour d'intégration pour le calcul de la circulation du champ autour de cette arête.

Lors de l'utilisation d'une alimentation par un générateur, les ondes  $a_k$  et  $b_k$  sont définies sur un accès  $k$  par :

$$a_k = \frac{V_k + Z_{c_k} I_k}{2\sqrt{Z_{c_k}}} \quad (2.8)$$

$$b_k = \frac{V_k - Z_{c_k} I_k}{2\sqrt{Z_{c_k}}} \quad (2.9)$$

A partir de ces deux relations, le coefficient de réflexion sur l'accès  $k$  s'exprime par la relation :

$$S_{kk} = \left. \frac{b_k}{a_k} \right|_{a_n=0, n \neq k} \quad (2.10)$$

De manière analogue, le coefficient de transmission entre l'accès  $k$  et un autre accès  $l$  s'exprime :

$$S_{lk} = \left. \frac{b_l}{a_k} \right|_{a_n=0, n \neq k} \quad (2.11)$$

En normalisant toutes les impédances de façon identique  $Z_0$  sur chaque accès, les relations 2.10 et 2.11 deviennent :

$$S_{kk} = \frac{V_k - Z_0 I_k}{V_k + Z_0 I_k} \quad (2.12)$$

$$S_{lk} = \frac{V_l - Z_0 I_l}{V_k + Z_0 I_k} \quad (2.13)$$

### 2.2.3.3 Calcul du DAS

Le DAS est déterminé en fonction du champ électrique par la relation suivante :

$$DAS = \frac{\sigma E^2}{2\rho} \quad (2.14)$$

où  $E$  correspond à l'amplitude du champ électrique dans le domaine fréquentiel (V/m) dans le tissu où le DAS est évalué. Sa conductivité  $\sigma$  (S/m) varie en fonction de la fréquence tandis la densité volumique  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) reste constante.

Cette formule est la méthode la plus employée pour résoudre les problèmes de dosimétrie numérique. Les calculs de DAS effectués durant cette thèse correspondent au DAS 10g représentant la valeur du DAS moyennée pour 10 g de tissus humains. Le DAS obtenu pour un organe comme l'œil est obtenu à partir du champ électrique moyenné sur l'ensemble des cellules nécessaire à sa description.

### 2.2.3.4 Modèle de corps humain utilisé

Le modèle de corps humain nommé Hugo et utilisé dans l'ensemble des problèmes de dosimétrie dans cette thèse provient du programme "The Visible Human Project" [80]. Il est constitué d'un ensemble de blocs diélectriques caractérisés par leur conductivité, leur permittivité et leur perméabilité. Le

modèle utilisé correspond au modèle homogène de Hugo à l'exception des yeux possédant leurs propres spécifications. Ses constantes diélectriques dans la bande [0-100] MHz sont données dans l'annexe C.

C'est un modèle souvent utilisé en simulation électromagnétique dans des problèmes de dosimétrie [81, 82]. Il provient du cadavre d'un homme disséqué en plusieurs milliers de couches et numérisé afin de pouvoir être utilisé lors de simulations numériques. Deux résolutions FDTD du modèle de Hugo sont à notre disposition. Les résolutions 8 et 4 mm sont illustrées dans la figure 2.3. Comme le montrent les figures 2.3c et 2.3d, la forme sphérique de l'œil nécessite un maillage adéquat. Une discrétisation spatiale fine donne une description plus fidèle de cet œil mais alourdit indubitablement les coûts en termes de calcul et de ressources informatiques.

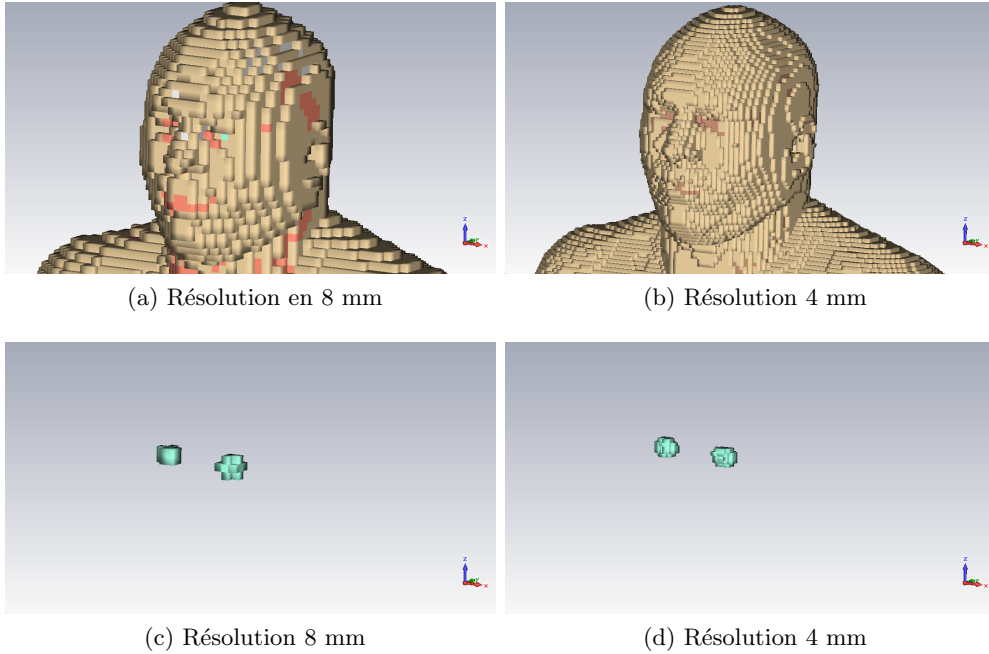


FIGURE 2.3 – Différentes résolutions de la tête et des yeux du modèle Hugo.

### 2.2.4 Exploitation de la méthode FDTD : calcul du DAS œil dans Hugo en espace libre

Afin d'illustrer une utilisation classique de la méthode FDTD et de pointer ses limites, nous proposons un problème simple de dosimétrie. Cette étude est issue de la réglementation DREP<sup>3</sup> publiée par le ministère de la défense. Elle vise à fournir des instructions au niveau de l'exposition du personnel militaire vis-à-vis du rayonnement électromagnétique [11]. Ce cas d'étude a été proposé en concertation avec Alexandre Laisné qui s'intéresse aux problématiques de dosimétrie numérique notamment au niveau de l'œil.

Dans notre cas d'étude, le DAS local dans l'œil gauche est calculé pour deux niveaux de résolution de Hugo soumis à un rayonnement électromagnétique. Une comparaison est proposée entre les résultats donnés par la FDTD et les résultats obtenus par Alexandre Laisné avec la méthode TLM et le logiciel CST Microstripes.

#### 2.2.4.1 Calcul du DAS en espace libre

##### Présentation du problème

Le problème considéré est illustré sur la figure 2.4. La valeur du DAS 10g est calculée dans l'œil gauche du modèle de corps humain pour une bande d'étude de fréquence [0-100] MHz. Ce dernier est soumis à une onde plane d'amplitude  $10 \text{ V/m}$  excitée à une fréquence maximale de 100 MHz. Elle se propage suivant une incidence orientée selon l'axe  $x$  (face à Hugo) et avec une polarisation verticale (axe  $z$ ). Le modèle est placé dans un volume en espace libre dont les dimensions sont de  $1,2 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ , soit pour la plus grande dimension  $0,8 \times \lambda_{100\text{MHz}}$ . Afin de pointer les limites de la FDTD, deux grilles de maillage sont utilisées. Une comparaison des valeurs du DAS 10g obtenues par FDTD et TLM ainsi qu'une comparaison des temps de calcul sont proposées.

##### Configuration de simulation

La simulation FDTD grossière est maillée avec une résolution de  $8 \text{ mm}$  ( $\frac{\lambda_{100\text{MHz}}}{375}$ )

---

3. Dangers des Rayonnements EM sur les Personnes

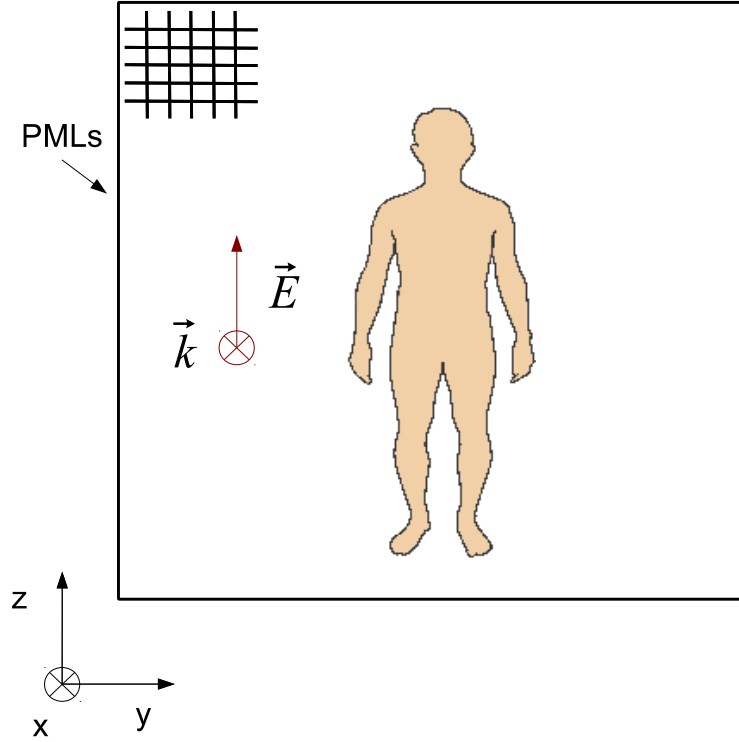


FIGURE 2.4 – Application de la FDTD dans le calcul du DAS local oeil gauche dans Hugo.

tandis que la simulation FDTD fine est maillée avec une résolution de 4 mm ( $\frac{\lambda_{100MHz}}{750}$ ). Le modèle de corps humain ainsi que ses yeux dans ces niveaux de description sont illustrés dans les figures 2.3. Ce volume est terminé par des couches absorbantes de type PML<sup>4</sup> [83] afin de simuler des conditions d'espace libre. Une cage d'excitation entoure le modèle de simulation et permet la propagation de l'onde plane à l'intérieur de ce volume (figure 2.4). Le modèle de corps humain proposé n'étant pas un modèle dispersif, il est nécessaire de reconduire ces simulations pour tous les points de fréquence. La valeur des caractéristiques ( $\epsilon_r$ ,  $\sigma$ ) en fonction de la fréquence pour cette étude sont données dans l'annexe C. Les champs électriques à l'intérieur de l'œil gauche sur toute la bande d'étude sont ainsi obtenus à la suite de toutes ces simulations. Le tableau 2.1 présente les différents paramètres de la simulation FDTD pour cette étude.

4. Perfectly Matched Layers

	FDTD	
	grossière	fine
Pas spatiaux $dx = dy = dz$	8 mm	4 mm
Pas temporel $dt$	15,3960 ps	7,6980 ps
Observation $T_{\text{obs}}$	60 ns	60 ns
Volume FDTD $N_x \times N_y \times N_z$	$150 \times 150 \times 300$	$300 \times 300 \times 600$

TABLE 2.1 – Paramètres de la configuration FDTD pour la simulation du problème Hugo soumis à une onde plane.

## Résultats et conclusion

A l'issue des simulations, la valeur du DAS est déterminée en fonction de la fréquence sur la bande [0-100] MHz. 10 points de mesure avec un pas de 10 MHz sont considérés. Les résultats sont comparés aux simulations réalisées avec une simulation numérique basée sur la méthode TLM (figure 2.5). Du point de vue des valeurs obtenues, la comparaison des méthodes FDTD et TLM pour un même niveau de résolution nous montre qu'il y a une convergence pour les deux méthodes. Les deux courbes présentent les mêmes tendances de variation avec un pic du DAS 10g à la fréquence de 60 MHz. La comparaison des résultats obtenus entre la FDTD grossière (8 mm ou FDTD-8) et la FDTD fine (4 mm ou FDTD-4) montre une différence remarquable. Elle montre en effet que le maillage 8 mm est trop lâche pour estimer précisément le DAS œil. Un maillage plus fin donne des résultats plus précis.

D'un point de vue du temps de calcul, une simulation FDTD grossière pour un point de fréquence est de 46 min soit un temps total de 460 min pour l'ensemble de la bande de fréquence. Pour une simulation FDTD fine, le temps de calcul pour un point de fréquence est de 475 min soit un temps total de 4750 min. En analysant ces résultats, l'usage d'une description plus fine apporte plus de précision au résultat. Cependant ce gain est nuancé par l'augmentation en termes de ressources informatiques et de temps de calcul. Face à ce temps de calcul prohibitif, il est nécessaire d'opter pour une méthode permettant de donner des valeurs précises dans des temps plus acceptables.

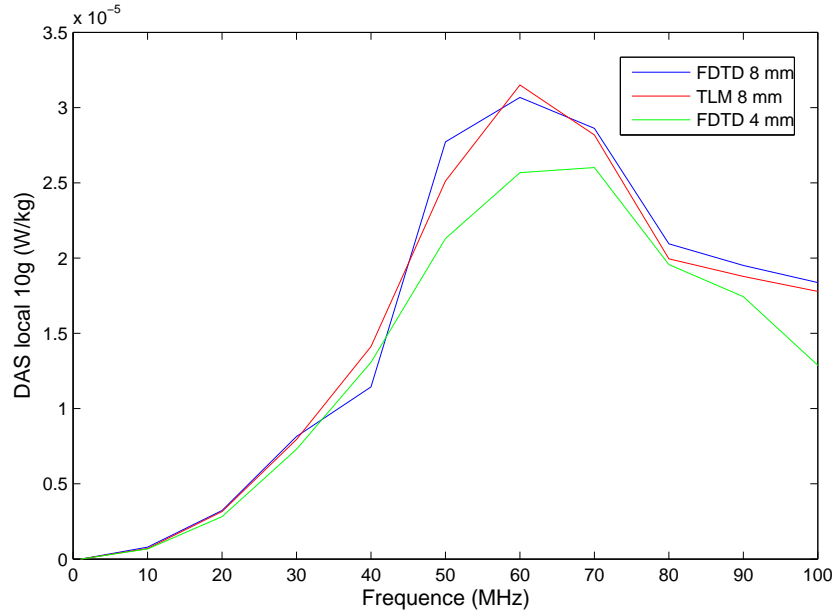


FIGURE 2.5 – Evolution du DAS local dans l’oeil gauche de Hugo en fonction de la fréquence par les méthodes FDTD et TLM.

Pour conclure, ce cas illustre l’exploitation simple de la méthode FDTD dans un problème de dosimétrie. Les valeurs du DAS ont été calculées en fonction de la fréquence et comparées à la méthode TLM. Les résultats obtenus dans ce cas confirme la limitation principale de la FDTD sous sa forme basique : une résolution plus fine augmente la précision des résultats mais conduit irrémédiablement à une très large augmentation des ressources nécessaires. Cette limitation se présente donc lorsqu’un niveau de description précis est nécessaire comme il est possible de rencontrer dans une problématique multi-échelle. Partant de ce constat, de nombreuses extensions de la FDTD ont été proposées. La partie suivante présente l’une d’entre elle : la DG-FDTD.

### 2.3 La DG-FDTD multiniveau et bilatérale

Le principe de la DG-FDTD est basé sur un constat : les différentes interactions électromagnétiques mises en jeu n’ont pas la même importance au sein d’un volume de calcul. Partant de cette observation, la méthode DG-FDTD propose de diviser l’analyse du problème électromagnétique en plusieurs étapes



correspondant à plusieurs simulations FDTD de résolutions différentes. Le transfert de l'information électromagnétique est assuré par l'utilisation de surfaces de prélèvement et d'excitation (outside ou inside) entre les différentes étapes. La surface de prélèvement récupère en amont les données adéquates tandis que l'excitation dans l'étape suivante est effectuée à l'aide d'une surface d'injection de type champ total / champ diffracté. Deux configurations avancées de la DG-FDTD ont été proposées : la DG-FDTD multiniveau et la DG-FDTD bilatérale. Les différentes études et exploitations menées par divers travaux antérieurs [51, 53], ont montré que cette extension de la FDTD présente des aspects intéressants en termes de gain en ressources informatiques et en temps de calcul. Grâce à sa simplicité de mise en œuvre, elle fournit des résultats stables en garantissant l'étude précise d'éléments rayonnants dans des contextes intégrant des environnements complexes et de grande taille.

### 2.3.1 Principe de la DG-FDTD multiniveau

La DG-FDTD multiniveau propose d'utiliser la DG-FDTD comme un outil de "zoom" ou "dézoom" électromagnétique (figure 2.6). Cette capacité permet d'analyser un problème avec une succession d'étapes possédant une résolution de plus en plus fine ou bien inversement, de plus en plus relâchée. L'intérêt est de pouvoir étudier les interactions électromagnétiques présentes entre un objet d'étude maillé finement et son milieu d'intégration décrit de manière grossière. La figure 2.6a montre le principe de la DG-FDTD utilisée pour sa capacité de zoom progressif. Une première étape, choisie avec une résolution grossière, décrit l'ensemble de l'environnement ainsi que l'objet d'étude. Une surface de prélèvement de champ autour de l'objet d'étude est paramétrée. Elle est utilisée comme cage d'excitation inside (excitation orientée vers l'intérieur de la cage [4]) dans une seconde simulation dans laquelle un zoom local autour de l'objet d'étude est effectué. Cette étape permet de considérer l'environnement proche de l'objet dans un niveau de maillage intermédiaire. De manière similaire à l'étape précédente, une surface de prélèvement est configurée. Enfin, une dernière étape décrit finement l'objet d'étude. Cette dernière étape est utilisée pour obtenir les résultats attendus. En résumé, cet outil permet de considérer l'ensemble du problème dans un premier temps, et, par la suite, de raffiner localement un volume précis de la boîte de simulation.

De façon inverse, cette méthode DG-FDTD multiniveau peut être utilisée pour sa capacité de zoom dégressif. En effet, après avoir finement maillé l'objet

d'étude, il est possible d'étudier son comportement au sein de son environnement maillé grossièrement comme le montre la figure 2.6b. Le passage d'une étape à une autre se fait par le biais de surface de prélèvement et de cage d'excitation outside. Dans l'exemple 2.6b, le couplage entre l'antenne et son environnement proche est pris en compte de manière grossière dans l'étape 2.

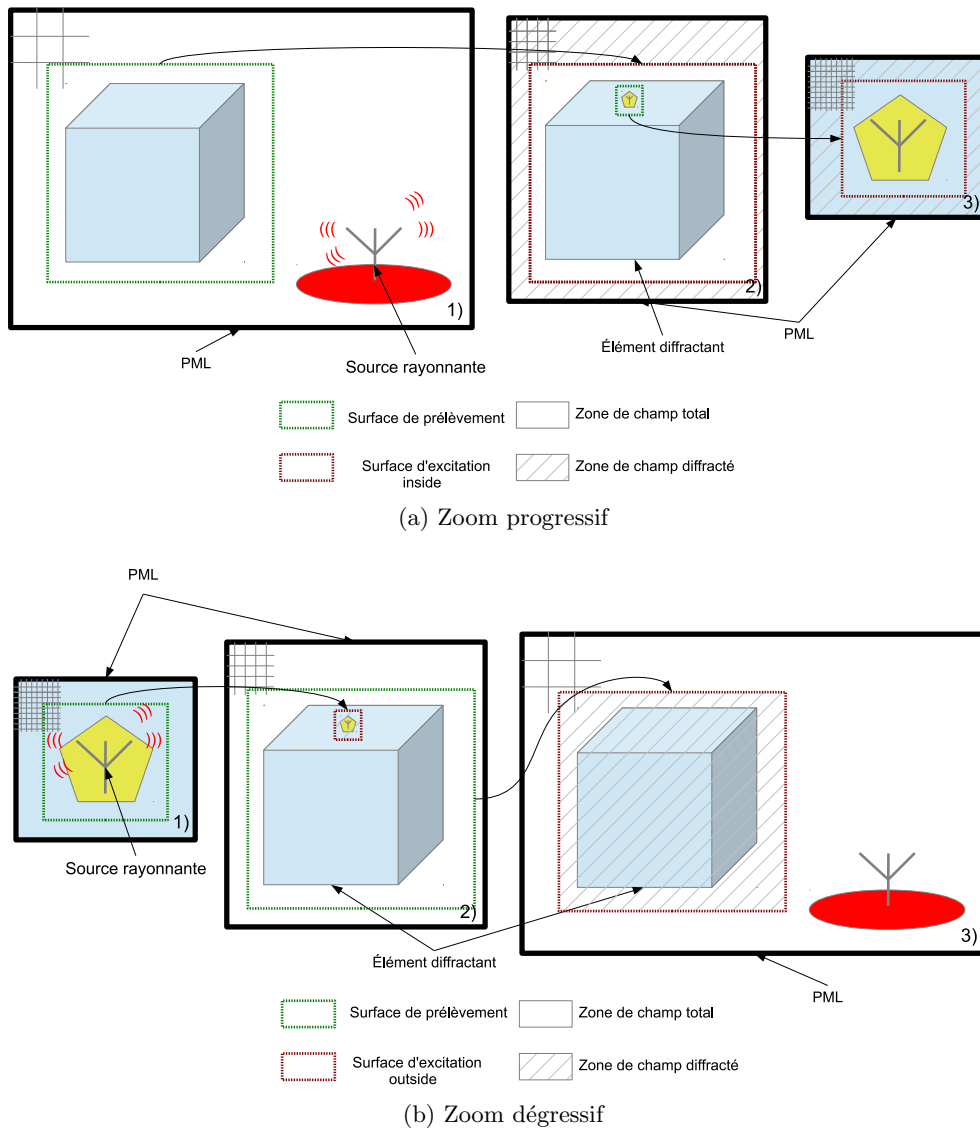


FIGURE 2.6 – Principe de la méthode DG-FDTD multiniveau.

### 2.3.2 Principe de la DG-FDTD bilatérale

Comme l'illustre la figure 2.7, le principe de la DG-FDTD bilatérale propose aussi de décomposer un problème électromagnétique en plusieurs étapes. Une première étape propose de décrire finement l'élément rayonnant dans laquelle une surface de prélèvement est paramétrée. Cette dernière est utilisée comme cage d'excitation outside dans une seconde étape décrite de manière relâchée. Cette deuxième étape permet de représenter grossièrement les éléments à analyser au sein de leur environnement. Une seconde surface de prélèvement est configurée. Une troisième et dernière étape propose de raffiner localement une partie du volume de l'environnement dans l'intention de décrire finement soit une antenne en réception, soit une partie précise de l'environnement. Cette étape est excitée grâce à une cage d'excitation inside. Cet outil développé par Céline Miry dans sa thèse [4] a été exploité avec succès dans des études ayant pour thème principal les réseaux BAN<sup>5</sup>.

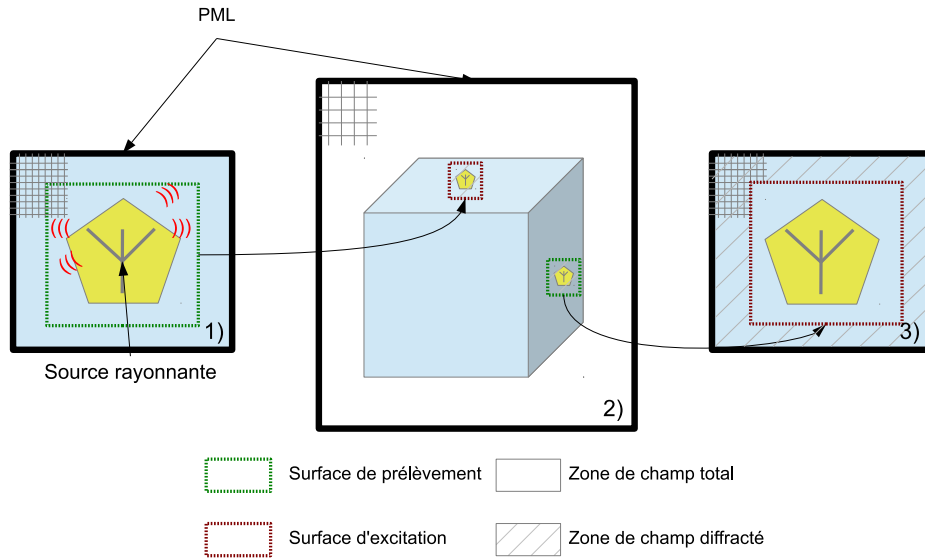


FIGURE 2.7 – Principe de la DG-FDTD bilatérale.

5. Body Area Network

### 2.3.3 Exploitation de la DG-FDTD : Calcul du DAS dans Hugo en espace libre

#### Présentation du problème

De façon à illustrer l'utilisation de la DG-FDTD multiniveau, nous considérons le problème proposé dans la section 2.2.4.1. Le volume de calcul est toujours excité par une onde plane possédant les mêmes caractéristiques. Le calcul du DAS est toujours proposé pour les deux niveaux de résolution 8 mm et 4 mm. Cette fois-ci, l'approche DG-FDTD ainsi que sa capacité de zoom électromagnétique progressif sont utilisées afin de raffiner la zone du volume incluant l'œil gauche (figure 2.8). Nous proposons d'étudier la valeur du DAS 10g pour l'œil gauche, décrit avec une résolution de 4 mm en utilisant trois approches. Plus précisément, une comparaison de la méthode DG-FDTD (8 vers 4 mm) avec les valeurs de références obtenues par la FDTD 8 et 4 mm est faite.

#### Configuration de simulation

La figure 2.8 montre la décomposition DG-FDTD du problème en deux étapes. Une première simulation FDTD avec un maillage de 8 mm est utilisée afin de décrire de manière relâchée le modèle Hugo. Cette simulation correspond exactement au volume utilisé dans la simulation FDTD grossière (8 mm) proposée dans la section 2.2.4.1. Une surface de prélèvement est définie autour de la tête. Cette surface est utilisée comme cage d'excitation dans une seconde simulation maillée, avec une résolution fine de 4 mm, afin de décrire plus fidèlement la tête. Le sous-volume de calcul pour la seconde étape de la DG-FDTD est de  $0,44 \text{ m} \times 0,44 \text{ m} \times 0,44 \text{ m}$  soit  $(0,1467 \times \lambda_{100\text{MHz}})^3$ .

L'ensemble du problème est simulé grâce aux différents paramètres présentés dans le tableau 2.2. Les configurations de la simulation FDTD de référence 8 mm sont reprises du tableau 2.1. De manière similaire, la première étape de la DG-FDTD est simulée en espace libre. Dans l'étape suivante, la partie de l'environnement autour de l'œil gauche (tête et son espace proche) est prolongée dans les PML. Les temps de simulation pour un point de fréquence sont présentés dans le tableau 2.3.

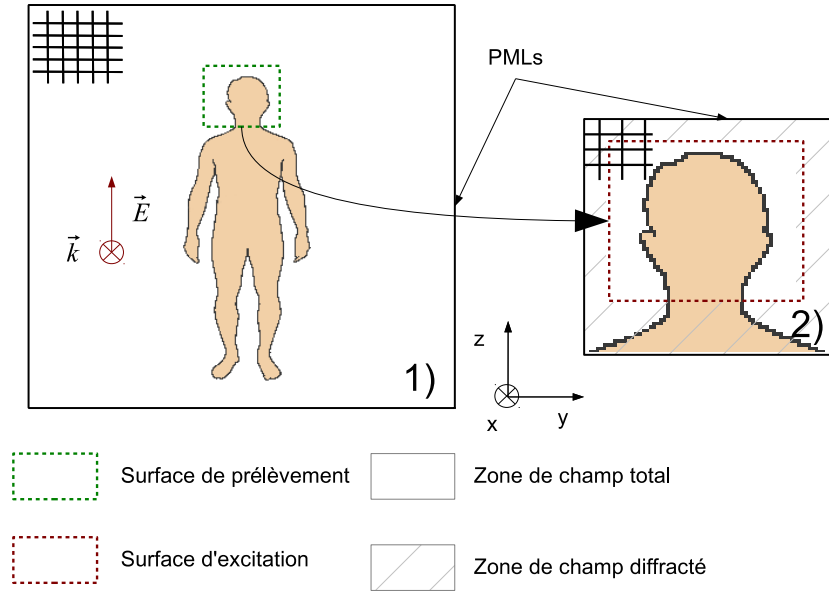


FIGURE 2.8 – Application de la DG-FDTD pour le calcul du DAS local oeil gauche dans Hugo.

	FDTD fine	DG-FDTD multiniveau	
		1 <sup>re</sup> étape	2 <sup>e</sup> étape
Pas spatiaux $dx = dy = dz$	4 mm	8 mm	4 mm
Pas temporel $dt$	7,6980 ps	15,3960 ps	7,6980 ps
Observation $T_{\text{obs}}$	60 ns	60 ns	60 ns
Volume FDTD $N_x \times N_y \times N_z$	$300 \times 300 \times 600$	$150 \times 150 \times 300$	$110 \times 110 \times 110$

TABLE 2.2 – Paramètres de la FDTD et de la DG-FDTD pour la simulation du problème Hugo soumis à une onde plane.

## Résultats

Les résultats pour cette étude sont présentés dans la figure 2.9. La comparaison des résultats obtenus avec la DG-FDTD-8-4 et la FDTD-4 montre une bonne cohérence. Ainsi, la DG-FDTD offre une estimation correcte du DAS œil en décrivant d'abord le corps en 8 mm, et en raffinant ensuite la tête à 4 mm. Il n'est donc pas nécessaire de décrire finement l'intégralité du corps car

un zoom autour de la zone de calcul du DAS est suffisant.

En matière de temps de calcul, comme le montre le tableau 2.3, la DG-FDTD permet de réduire le temps de calcul tout en approchant la précision du calcul FDTD fin.

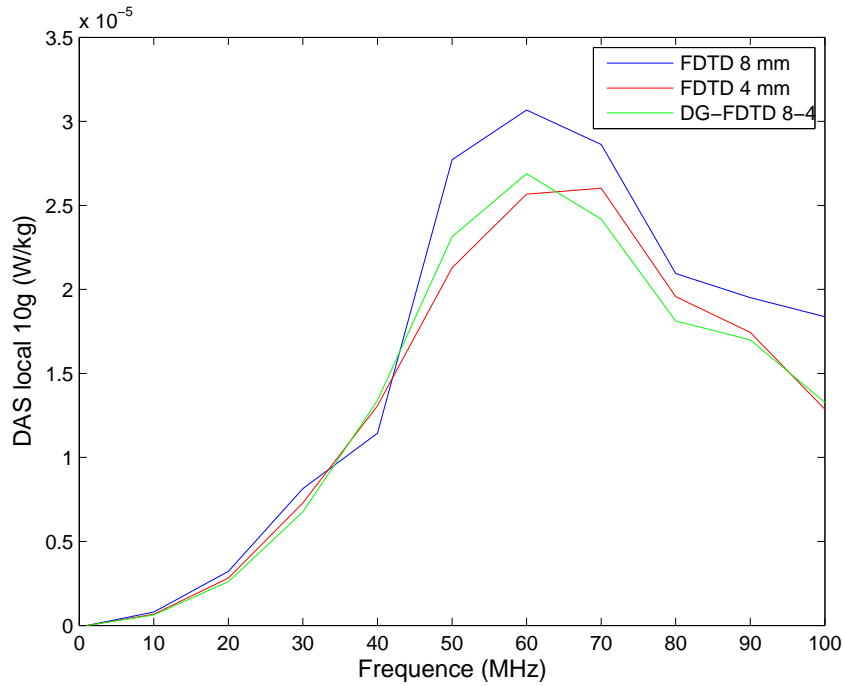


FIGURE 2.9 – Evolution du DAS local dans l'œil gauche de Hugo en fonction de la fréquence.

	Temps de calcul
FDTD 8 mm	46 min
FDTD 4 mm	475 min
DG-FDTD 8-4	77 min

TABLE 2.3 – Temps de simulation du problème Hugo soumis à une onde plane.

### 2.3.4 Conclusion

Ce chapitre s'est intéressé au principe de la DG-FDTD en montrant un exemple d'exploitation sur une étude précédemment résolue par la méthode FDTD. Cette méthode comparée à la FDTD sous sa forme basique offre des avantages en termes de temps de calcul tout en proposant une bonne précision des résultats. De par sa simplicité d'application, la DG-FDTD est donc un atout de choix dans un problème multi-échelle.

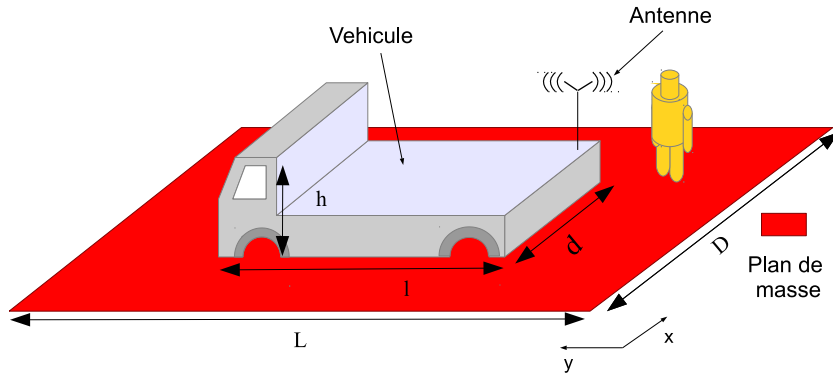
## 2.4 Exploitation : Application de la DG-FDTD dans un scénario de dosimétrie fortement multi-échelle

Afin d'illustrer une application de la méthode DG-FDTD dans un cas concret, nous proposons la résolution d'un problème fortement multi-échelle. Ce cas traite un problème électromagnétique présentant un caractère multi-échelle dans un environnement de grande taille. Le bilan présenté dans la section 2.2.4.1 a montré que l'usage de la FDTD sous sa forme basique montre des limites dans ce genre de cas. Grâce à son approche multirésolution, la méthode DG-FDTD est une candidate idéale pour traiter cette application présentant un fort contraste d'échelle. Dans un premier temps, la résolution se fait pour une position donnée. La possibilité d'exploitation dans un cas variable, c'est-à-dire pour une multitude de positions, est ensuite discutée.

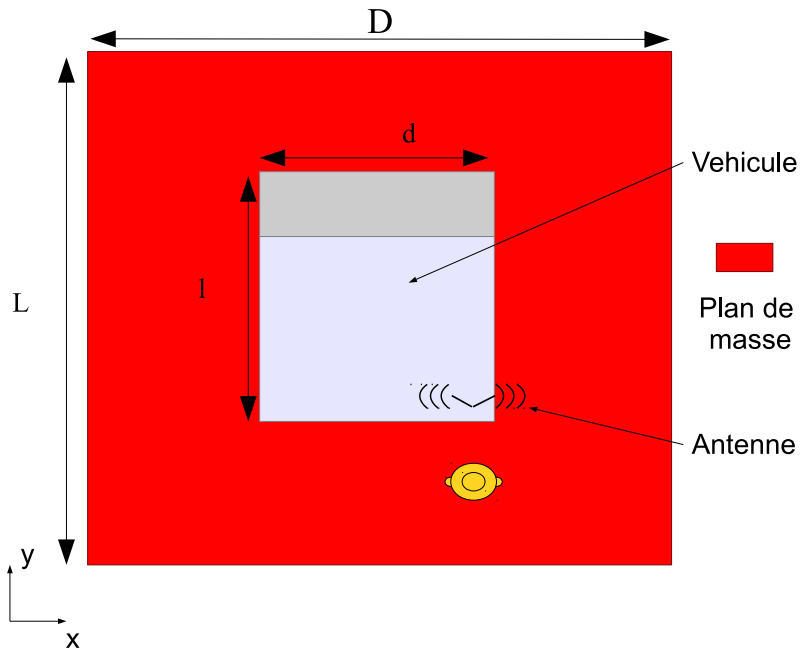
### 2.4.1 Présentation du problème

L'objectif de notre étude est de calculer le champ électromagnétique autour du modèle du corps humain Hugo, situé à proximité d'une antenne embarquée sur un véhicule (cf. figure 2.10). Le véhicule et la personne se trouvent dans le champ proche d'une antenne monopôle de fréquence centrale 60 MHz. Cette dernière délivre une excitation gaussienne dans le domaine temporel et couvre la bande HF/VHF ([0-100] MHz). Pour ces longueurs d'ondes, le véhicule et Hugo se trouvent dans la zone de champ proche de l'aérien, ce qui nécessite un maillage de l'ensemble des éléments dans un même volume de calcul. Le générateur de tension de l'émetteur fournit un signal de 10 V d'amplitude maximale. Les caractéristiques du scénario sont les suivantes :

- $h = 0,6933 \times \lambda_{100\text{MHz}} = 2,08 \text{ m}$ ,



(a) Vue de côté



(b) Vue de dessus

FIGURE 2.10 – Scénario sélectionné sur le thème de la dosimétrie.

- $d = 0,64 \times \lambda_{100\text{MHz}} = 1,92 \text{ m}$ ,
- $l = 1,4933 \times \lambda_{100\text{MHz}} = 4,48 \text{ m}$ ,
- $D = L = 3,4133 \times \lambda_{100\text{MHz}} = 10,24 \text{ m}$ .

Le véhicule et le sol sont modélisés par des PEC<sup>6</sup>. Pour cette étude, une seule position de Hugo est considérée.

6. Perfect Electric Conductor



Au vu des dimensions de la scène, il est important de signaler que ce scénario est impossible à résoudre avec une simulation FDTD classique. En effet, la géométrie complexe du modèle Hugo nécessite l'utilisation d'une description suffisamment précise. La résolution 8 mm, employée dans le cas traité dans la section 2.2.4.1, est utilisée. Bien que cette résolution ne fournisse pas de résultats aussi précis que le modèle 4 mm, ils sont considérés comme suffisants pour ce cas de figure. En effet, cette résolution a l'avantage de proposer un maillage suffisamment fin pour pouvoir représenter fidèlement les contours du corps humain dans des temps de simulation acceptables. En revanche, l'application d'un tel niveau de maillage dans le volume du problème entraîne un suréchantillonnage du reste de l'environnement qui peut s'avérer inutile. De plus, il alourdit les temps de calcul et augmente les coûts en termes de ressources informatiques.

Par conséquent, nous proposons d'utiliser la DG-FDTD et sa capacité de zoom électromagnétique afin de d'évaluer la valeur du champ électromagnétique autour du modèle de corps humain. Cette méthode permettra de raffiner le volume autour de Hugo et d'ainsi, fournir des résultats plus précis dans des temps plus acceptables.

## 2.4.2 Configuration de simulation

La décomposition du problème est illustrée sur la figure 2.11. Les simulations DG-FDTD sont effectuées pour un modèle de corps humain dont les caractéristiques sont définies à la fréquence de 60 MHz. Ce choix, négligeant la dispersion des caractéristiques des tissus, se justifie par le problème traité dans la section 2.3.3. Les résultats ont montré que le DAS atteint sa valeur maximale dans la bande d'étude [0-100] MHz. Ces caractéristiques, à cette fréquence, sont données dans l'annexe C.

Une première simulation décrit l'environnement et le modèle Hugo avec un maillage relâché. En effet, en tenant compte de la dimension du scénario et de la bande de fréquence étudiée, un choix de maillage de 160 mm ( $\frac{\lambda_{100\text{MHz}}}{19}$ ) semble être un bon compromis. Ici, le champ prélevé autour du corps humain est utilisé comme source d'excitation pour la seconde étape représentant plus fidèlement le corps humain. Les temps d'observation de chaque étape sont choisis de manière à ce que l'énergie électromagnétique soit évacuée du volume

à la fin de la simulation. Pour cela, un temps de  $T_{\text{obs}}$  de 300 ns est choisi. Le tableau 2.4 présente les paramètres de simulation.

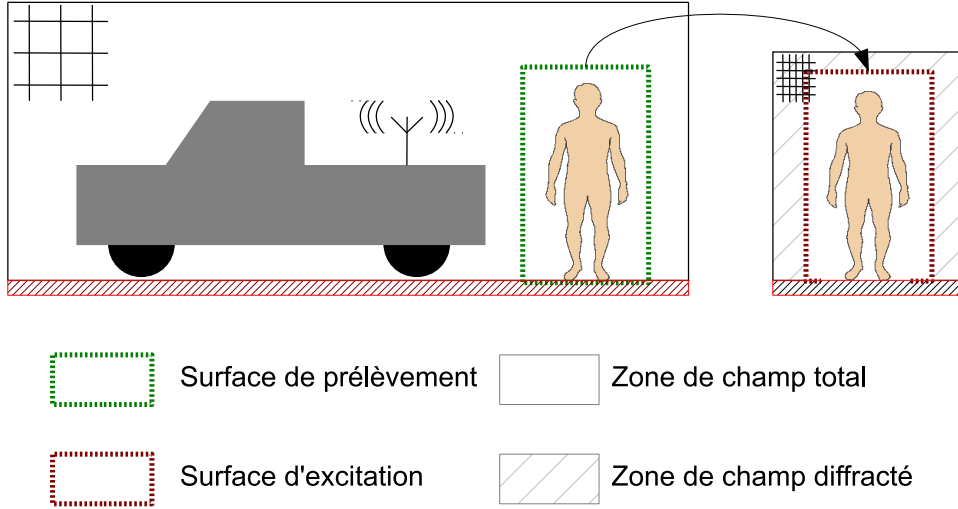


FIGURE 2.11 – Décomposition DG-FDTD du problème multi-échelle.

	DG-FDTD	
	1 <sup>re</sup> étape	2 <sup>e</sup> étape
Pas spatiaux $dx = dy = dz$	160 mm	8 mm
Pas temporel $dt$	0.30792 ns	15.396 ps
Observation $T_{\text{obs}}$	300 ns	300 ns
Volume FDTD $N_x \times N_y \times N_z$	$90 \times 90 \times 40$	$150 \times 150 \times 300$

TABLE 2.4 – Paramètres de la configuration DG-FDTD pour le problème multi-échelle.

Afin d'exploiter la méthode DG-FDTD, trois cartographies de champ électrique à la fréquence de 60 MHz sont proposées. Elles sont normalisées par rapport à la valeur maximale du champ.

### 2.4.3 Résultats et conclusion

A l'issue de la simulation de la première étape, une première cartographie de champ électrique est obtenue (figure 2.12). Elle nous montre la manière dont

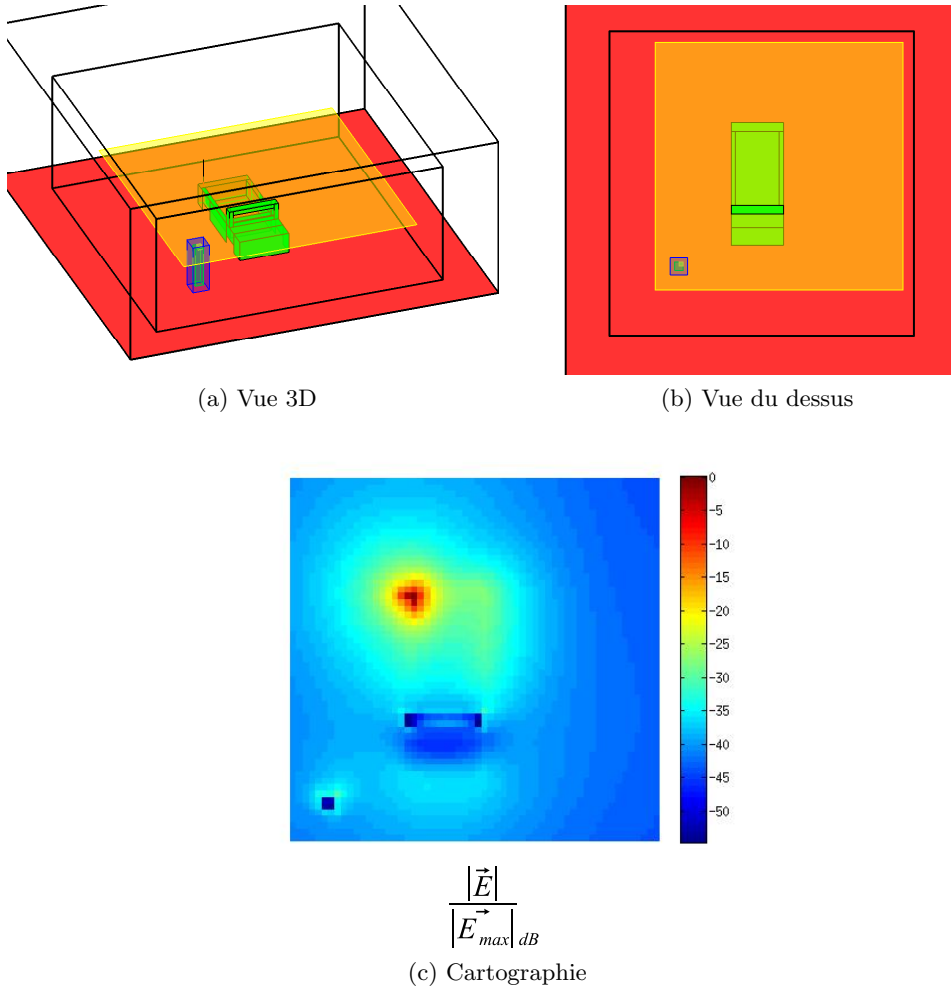
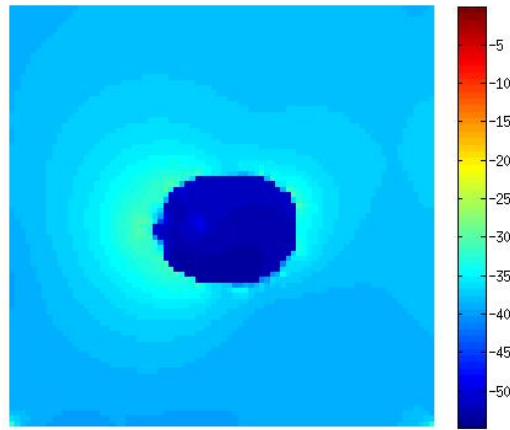
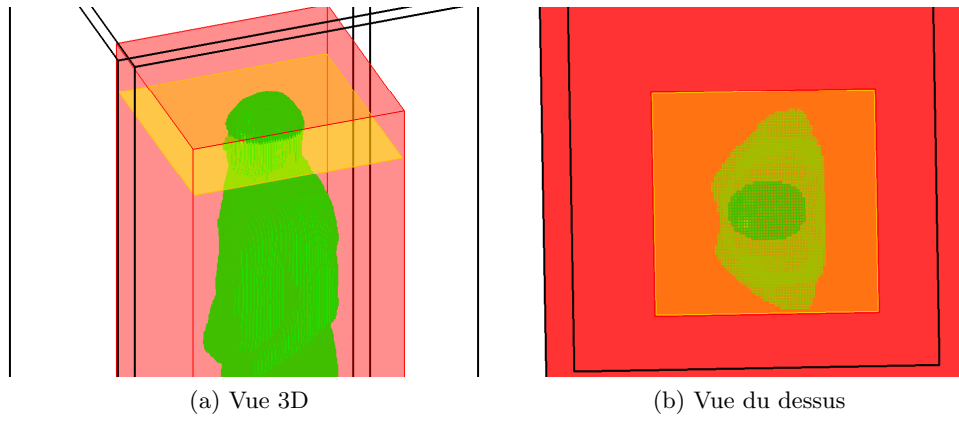


FIGURE 2.12 – Cartographie de la 1<sup>re</sup> étape du scénario multi-échelle.

le champ électrique se répartit dans l'environnement. Les zones de rayonnement maximal se concentrent principalement autour de l'antenne. Des zones de concentration plus atténuées sont situées autour du véhicule et à proximité d'Hugo. Pour la seconde étape, deux autres cartographies du champ électrique sont proposées et sont représentées respectivement sur les figures 2.13 et 2.14.

La seconde cartographie correspond à une cartographie de champ électrique, traversant la tête et située dans le plan  $z$  constant à la hauteur des yeux. Des zones de concentration de champ plus intense s'observent devant le visage et à l'arrière de la tête. La dernière cartographie est une cartographie de champ électrique, dans le plan  $x$  constant et prise le long du modèle de corps humain.



(c) Cartographie

FIGURE 2.13 – Cartographie de la 2<sup>e</sup> étape du scénario multi-échelle - Tête.

DG-FDTD bilatérale	Temps de calcul
1 <sup>re</sup> étape	0,56 min
2 <sup>e</sup> étape	356,48 min

TABLE 2.5 – Temps de simulation du problème multi-échelle.

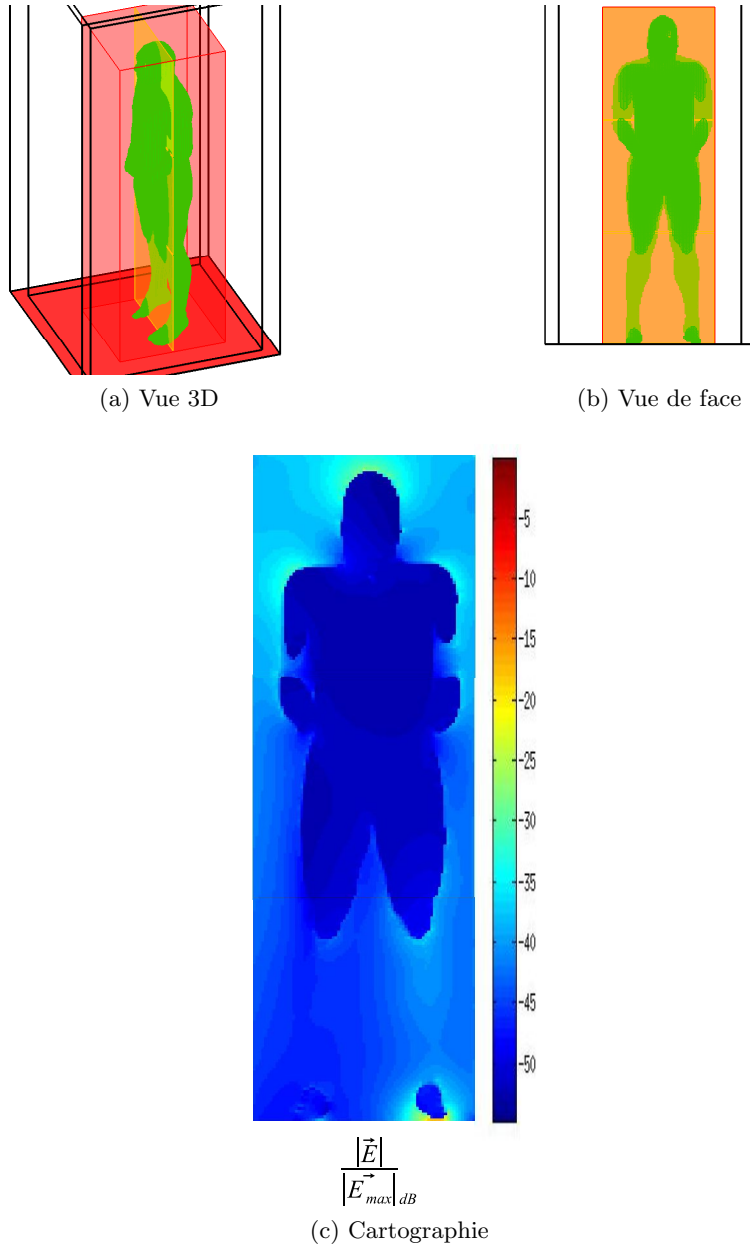


FIGURE 2.14 – Cartographie de la 2<sup>e</sup> étape du scénario multi-échelle - Corps humain.

De manière analogue, des zones de concentrations de champ sont situées au sommet du crâne et au niveau des épaules. Comme ces cartographies suggèrent, les champs électriques à l'intérieur de Hugo sont très faibles comparés

à ceux situés à l'extérieur des tissus humains à cette fréquence.

Le tableau 2.5 présente les temps de simulation pour les deux étapes de la DG-FDTD. La simulation d'un cas complet prend 357,04 min. Ce temps de simulation important est principalement dû à la simulation fine de la 2<sup>e</sup> étape tandis que la 1<sup>re</sup> étape nécessite seulement 0,56 min. Ainsi, pour toute nouvelle position, la méthode DG-FDTD impose le lancement de ces deux étapes. Une étude portant sur l'ensemble des positions autour du véhicule multiplierait l'emploi de cette méthode et nécessiterait donc un énorme investissement en temps de calcul.

En analysant la méthode DG-FDTD et les deux étapes utilisées, une démarche alternative peut être proposée. Dans l'hypothèse d'un simple changement de position de la personne, on remarque que seule la 1<sup>re</sup> étape change. La seconde étape, la plus coûteuse en temps, reste géométriquement identique et seuls les champs d'excitation diffèrent. Partant de ce constat, il serait intéressant de substituer cette seconde étape par un modèle permettant de calculer rapidement le champ en un point interne du corps (dans notre cas à l'intérieur de l'oeil ) à partir des champs d'excitation issus de la 1<sup>re</sup> étape.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une approche basée sur la FDTD a été présentée. Déclinée sous deux formes possibles, la DG-FDTD permet de traiter efficacement des problèmes électromagnétiques impliquant des éléments de tailles et de natures variées. Sa capacité à traiter un scénario sous la forme de succession d'étapes avec différents niveaux de description lui permet de résoudre des problèmes possédant un fort contraste d'échelle.

La DG-FDTD a d'abord été appliquée dans deux cas de figure. La première situation correspond à un problème de dosimétrie. Le DAS local a pu être calculé dans l'œil gauche d'un modèle de corps humain soumis à une onde plane de fréquence 100 MHz pour deux niveaux de résolution. Enfin, la capacité de zoom électromagnétique proposée par la DG-FDTD a été utilisée pour traiter un scénario fortement multi-échelle : un modèle de corps humain placé autour d'un véhicule surmonté d'une antenne.

Les différents résultats montrent que l'approche reste précise et permet une réduction relativement importante des ressources informatiques nécessaires au calcul. La DG-FDTD permet de résoudre des cas de figure (notamment celui proposé par le scénario multi-échelle) qui ne sont pas facilement envisageables avec l'emploi de méthodes classiques (FIT, TLM ou FDTD). De plus, de par sa simplicité de mise en œuvre, c'est une méthode facile à appréhender. Cependant, comme nous le montre la discussion proposée dans la dernière partie de ce chapitre, cette méthode n'est pas encore optimisée pour traiter un problème variable. En effet, dans un scénario fortement multi-échelle, l'étude d'une nouvelle position de notre modèle de corps humain requiert le lancement de toutes les étapes de la DG-FDTD, ce qui nécessite un temps conséquent à cause, notamment, de la présence de la simulation fine de la dernière étape. Cet inconvénient freine l'emploi de cette méthode pour une étude portant sur plusieurs positions. Le chapitre suivant propose de palier ce problème en suggérant l'utilisation d'un modèle de substitution. Cette nouvelle approche est une nouvelle extension de la DG-FDTD, plus adaptée à l'étude d'une problématique variable.

## Chapitre 3

# Utilisation d'un Macro-Model dans la DG-FDTD

---

3.1	Introduction . . . . .	<b>62</b>
3.2	Principe de la MM-DG-FDTD . . . . .	<b>62</b>
3.2.1	Première étape . . . . .	63
3.2.2	Seconde étape . . . . .	64
3.2.3	Bilan introductif sur la MM-DG-FDTD . . . . .	65
3.3	Détails de mise en oeuvre . . . . .	<b>65</b>
3.3.1	Description du modèle de substitution et calcul des fonctions de transfert . . . . .	65
3.3.2	Procédure de détermination du modèle de substi- tution . . . . .	69
3.3.3	Synthèse de l'algorithme global de la MM-DG-FDTD	70
3.4	Validation du modèle de substitution . . . . .	<b>70</b>
3.4.1	Validation n°1 : estimation du champ électrique dans un bloc diélectrique . . . . .	72
3.4.2	Validation n°2 : Étude d'une transmission entre deux antennes filaires . . . . .	76
3.4.3	Conclusion . . . . .	79
3.5	Validation de la MM-DG-FDTD . . . . .	<b>80</b>
3.5.1	Validation n°1 : estimation du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain . . .	81
3.5.2	Validation n°2 : étude d'une transmission entre deux antennes ULB . . . . .	85
3.5.3	Conclusion partielle pour la seconde validation . .	92





### 3.1 Introduction

Le chapitre précédent a montré que la DG-FDTD présente des aspects intéressants en termes de gain en ressources informatiques et en temps de calcul. Elle garantit l'étude précise de problèmes fortement multi-échelles intégrant un environnement potentiellement de grande taille composé d'éléments complexes tels que des véhicules, des antennes ou un modèle de corps humain. Néanmoins, son usage dans un problème variable devient vite limité à cause du temps requis par la multiplication des simulations. En effet, comme nous l'a montrée la dernière étude du chapitre précédent, l'usage de la méthode DG-FDTD impose la simulation de toutes les étapes même les plus onéreuses en temps de calcul. L'insertion d'un macromodèle ou d'un modèle de substitution dans l'intérêt de s'affranchir de certaines étapes, semble être une bonne alternative à la contrainte imposée par la DG-FDTD.

Dans ce chapitre, une nouvelle extension de la DG-FDTD est proposée pour permettre le traitement du caractère variable d'un problème. Elle est nommée la MM-DG-FDTD<sup>1</sup>. Dans un premier temps, le principe de la méthode ainsi que les détails de sa mise en œuvre sont exposés. La validation du modèle de substitution seul est effectuée dans un second temps grâce à deux cas canoniques : le premier dans un contexte de dosimétrie et le second dans une transmission simple entre antennes. Pour finir, la combinaison de ce modèle avec la méthode DG-FDTD formant ainsi la méthode MM-DG-FDTD est utilisée dans deux cas applicatifs. La première application rencontrée à la fin du chapitre 2 et une seconde application mettant en scène une transmission entre antennes complexes sont résolues grâce à cette nouvelle extension qui montre toute son efficacité et ses performances.

### 3.2 Principe de la MM-DG-FDTD

Considérons le problème électromagnétique présenté à la figure 3.1. Nous nous intéressons à l'évaluation des champs électromagnétiques en un point d'un objet d'étude situé dans un grand environnement comportant des éléments diffractant. Cet objet est de petite taille comparé au reste de l'environnement. De surcroît, il est nécessaire d'utiliser un maillage fin pour sa

---

1. MacroModel based DG-FDTD

description tandis que l'environnement peut être décrit correctement à l'aide d'un maillage plus grossier. Le champ électromagnétique en un point de l'objet d'étude doit être calculé pour plusieurs positions de l'objet dans l'environnement.

La MM-DG-FDTD nécessite de diviser le problème en autant d'étapes que la DG-FDTD classique (illustrée à la figure 1.9 du chapitre 1). Dans le problème considéré à la figure 3.1, deux étapes sont nécessaires.

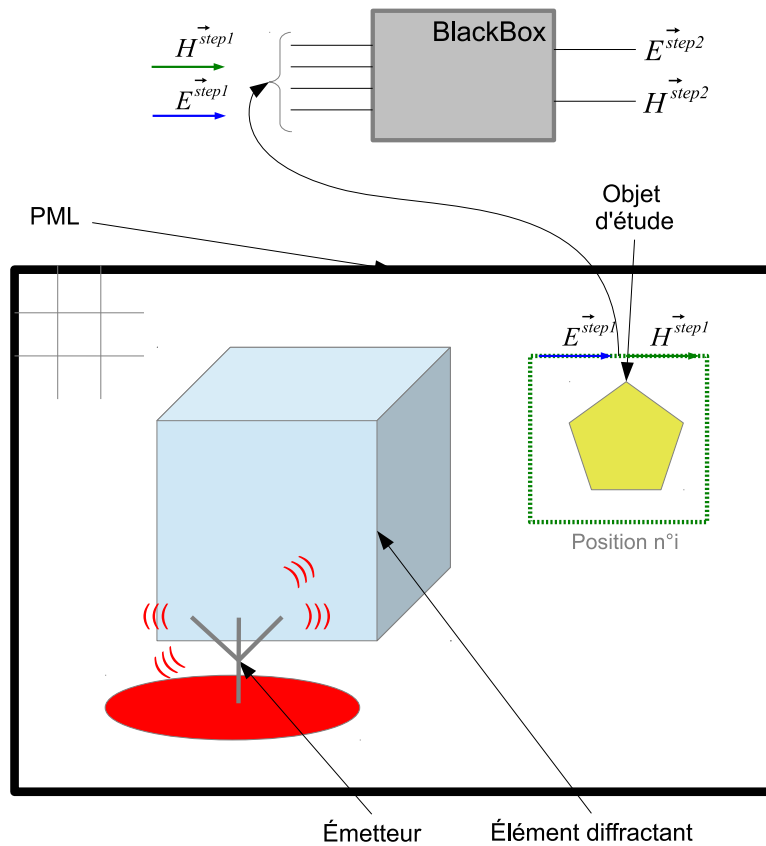


FIGURE 3.1 – Principe de la méthode MM-DG-FDTD.

### 3.2.1 Première étape

La première étape de la MM-DG-FDTD est identique à la première étape de la DG-FDTD classique. Elle correspond à une simulation FDTD grossière dont l'objectif est de caractériser l'ensemble de l'environnement y compris

l'objet d'étude. La résolution est principalement régie par la plus petite longueur d'onde considérée. Une surface de prélèvement de type inside est placée autour de l'objet afin de stocker les champs incidents entrant à proximité de l'objet. Ce champ comprend, à un niveau grossier, toutes les interactions électromagnétiques entre l'objet d'étude et l'environnement.

### 3.2.2 Seconde étape

La seconde étape de la MM-DG-FDTD vise à calculer rapidement le champ électromagnétique en un point de l'objet d'étude en réponse au champ incident issu de l'étape précédente. Lors de l'utilisation de la DG-FDTD classique, une simulation FDTD fine et coûteuse de l'objet d'étude est exécutée. La méthode MM-DG-FDTD propose de remplacer cette simulation fine par l'utilisation d'un modèle de substitution construit au préalable.

Le caractère variable dans le problème considéré correspond à la variation de la position de l'objet d'étude dans l'environnement. Lors d'un changement de position, seule la valeur des champs incidents récoltés sur la surface de prélèvement varie. Dans le cas où l'objet d'étude est un élément passif et dans le domaine fréquentiel, la relation entre le champ à l'intérieur de l'objet et le champ incident sur la surface de prélèvement est linéaire. Ainsi, l'objet peut être modélisé par des fonctions de transfert reliant, en entrée, les champs incidents prélevés dans la première étape et, en sortie, le champ électromagnétique en un point de l'objet d'étude. Comme exposé dans le paragraphe 3.3, le calcul de ces fonctions de transfert peut être réalisé avec peu de simulations FDTD fines de l'objet grâce au théorème de réciprocité. Une fois la construction de ce modèle effectuée, il est ainsi possible de traiter un problème variable sans avoir à exécuter la dernière simulation FDTD fine de l'objet d'étude mais en utilisant le modèle de substitution.

Dans le domaine fréquentiel, le modèle considère l'étape substituée comme un système linéaire (figure 3.1). Les entrées correspondent aux composantes des champs localisées dans les  $N$  cellules FDTD de la surface de prélèvement  $S$  recueillies à l'étape 1. La sortie correspond au champ électrique ( $\vec{E}^{step2}$ ) ou au champ magnétique ( $\vec{H}^{step2}$ ) en un point de l'objet. En utilisant le principe de superposition et la linéarité du problème, la sortie est déterminée grâce à la multiplication des entrées par des fonctions de transfert comme le montrent

les équations :

$$E_u^{step2}(\vec{r}_{out}) = \sum_{i=1}^N [\vec{F}_u^E(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in_i}).\vec{E}^{step1}(\vec{r}_{in_i}) + \vec{F}_u^H(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in_i}).\vec{H}^{step1}(\vec{r}_{in_i})] \quad (3.1)$$

$$H_u^{step2}(\vec{r}_{out}) = \sum_{i=1}^N [\vec{G}_u^E(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in_i}).\vec{E}^{step1}(\vec{r}_{in_i}) + \vec{G}_u^H(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in_i}).\vec{H}^{step1}(\vec{r}_{in_i})] \quad (3.2)$$

où :

- $u = x, y \text{ ou } z$  sont les trois axes du repère cartésien,
- $\vec{r}_{in_i}$  appartient à la cellule  $i$  de surface  $S$ ,
- $\vec{r}_{out}$  localise la sortie où le champ doit être calculé,
- $N$  est le nombre de cellules constituant la surface  $S$ ,
- $\vec{F}_u^E, \vec{F}_u^H, \vec{G}_u^E$  et  $\vec{G}_u^H$  sont les fonctions de transfert.

### 3.2.3 Bilan introductif sur la MM-DG-FDTD

En résumé, la MM-DG-FDTD permet l'analyse précise d'un problème multi-échelle possédant un caractère variable afin de déterminer les champs électromagnétiques en un point au sein de l'objet d'étude. Cette nouvelle approche propose d'associer les étapes de la DG-FDTD avec une utilisation d'un modèle de substitution dans une dernière étape dans le but de s'affranchir du lancement de la dernière simulation FDTD fine. Cette combinaison permet ainsi de fournir des résultats à partir des champs récoltés lors de l'étape précédent l'utilisation du modèle. Cependant, l'utilisation de la MM-DG-FDTD passe par une phase de construction du modèle grâce à un processus bien défini.

La prochaine partie détaille la mise en œuvre de la nouvelle méthode. Le mode de fonctionnement ainsi que les calculs des fonctions de transfert sont détaillés.

## 3.3 Détails de mise en oeuvre

### 3.3.1 Description du modèle de substitution et calcul des fonctions de transfert

Comme il est possible d'observer dans la partie précédente, la MM-DG-FDTD se distingue d'une DG-FDTD classique par l'utilisation d'un modèle

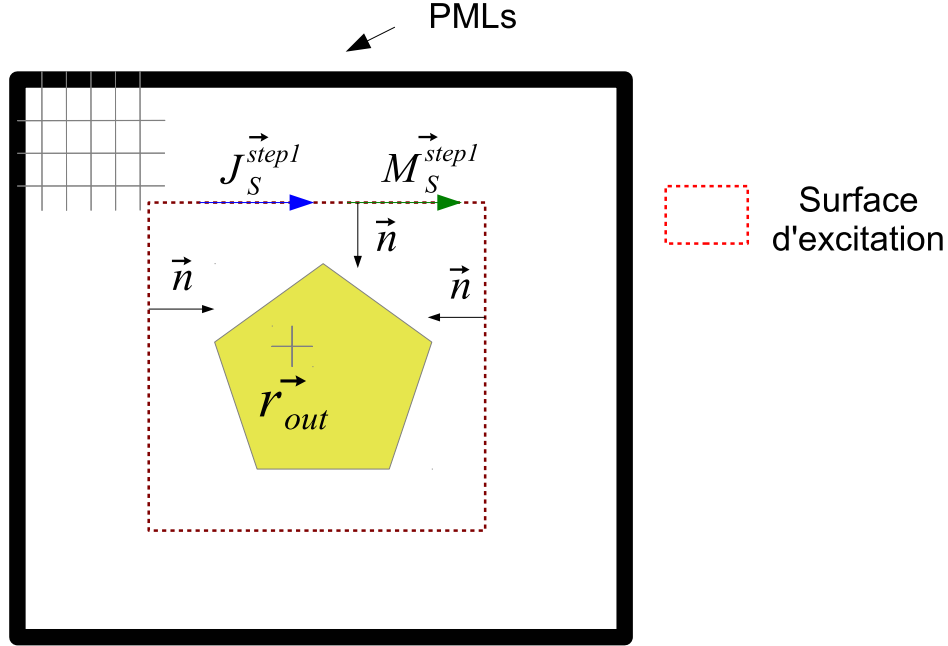


FIGURE 3.2 – Construction du modèle de substitution : problème équivalent.

de substitution. Ce dernier est inspiré du modèle proposé par [72] évoqué à la fin du paragraphe 1.4.3.2 du chapitre 1.

Les fonctions de transfert sont déterminées grâce au théorème de réciprocité. Ce théorème, appliqué principalement dans le domaine de l'électricité, est connu sous le nom de théorème de réciprocité de Lorentz dans le domaine de l'électromagnétisme [?].

Les paragraphes suivants présentent en détail la construction du modèle de substitution. Dans un premier temps, le calcul des fonctions de transfert liées au champ  $E$  est détaillé. De façon similaire, la détermination des fonctions de transfert pour le champ  $H$  est expliquée dans un second temps. Les particularités relatives à la construction du modèle sont exposées dans un dernier temps.

### 3.3.1.1 Calcul des fonctions de transfert $\vec{F}_u^E$ et $\vec{F}_u^H$

Pour construire le modèle de substitution, un problème équivalent à l'étape substituée est d'abord considéré. Ce problème est illustré dans la figure 3.2. Les champs  $\{\vec{E}^{step1}; \vec{H}^{step1}\}$  situés sur la surface de prélèvement  $S$  sont remplacés

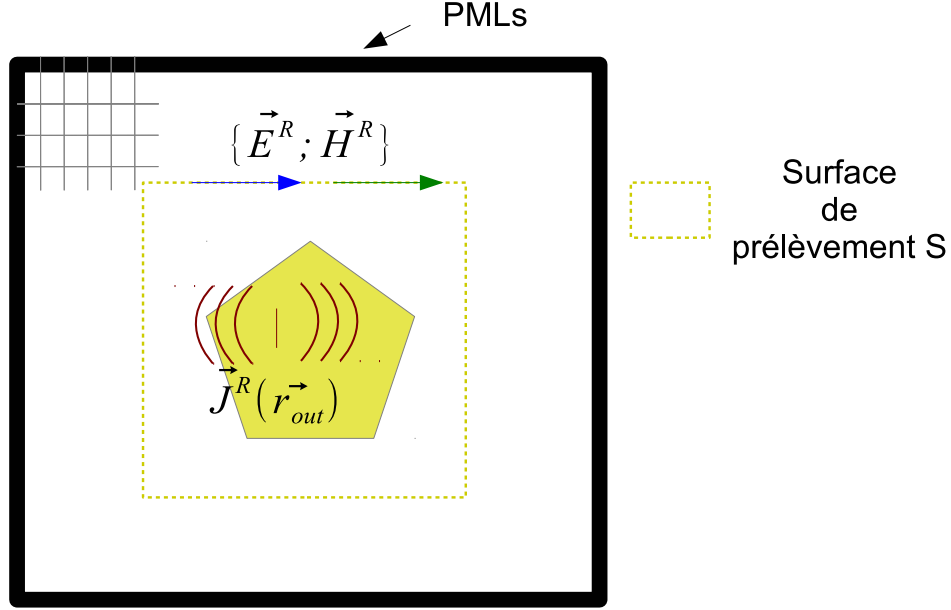


FIGURE 3.3 – Construction du modèle de substitution : problème réciproque.

par des courant surfaciques  $\{\vec{J}_S^{step1}; \vec{M}_S^{step1}\}$  en utilisant la théorie de Huygens :

$$\vec{J}_S^{step1} = -\vec{H}^{step1} \wedge \vec{n} \quad (3.3)$$

$$\vec{M}_S^{step1} = \vec{E}^{step1} \wedge \vec{n} \quad (3.4)$$

Afin de déterminer les fonctions de transfert  $\vec{F}_u^E$  et  $\vec{F}_u^H$ , un problème réciproque est considéré dans lequel une source  $\vec{J}^R$  est située au point de sortie  $\vec{r}_{out}$ . Cette source génère un champ  $\{\vec{E}^R; \vec{H}^R\}$  sur les  $N$  cellules de la surface  $S$  comme le montre la figure 3.3. Dans le domaine fréquentiel et selon le théorème de réciprocité [?], les sources et les champs du problème équivalent sont reliées aux sources et aux champs du problème réciproque par l'équation suivante :

$$\oint_S (\vec{E}^R \cdot \vec{J}_S^{step1} - \vec{H}^R \cdot \vec{M}_S^{step1}) dS = \iiint_V (\vec{E}^{step2} \cdot \vec{J}^R) dV \quad (3.5)$$

où  $V$  est le volume compris à l'intérieur de la surface de prélèvement  $S$  et  $\vec{J}^R$  la densité volumique.

Les relations 3.3, 3.4 et 3.5 montrent que si les champs du problème réciproque  $\{\vec{E}^R; \vec{H}^R\}$  en réponse à une source  $\vec{J}_R$  donnée sont connus sur  $S$ , alors les fonctions de transfert  $\vec{F}_u^E$  et  $\vec{F}_u^H$  peuvent être déterminées.

Pour ce faire, une seule simulation FDTD fine du problème réciproque est effectuée. Pour cette simulation, le volume de calcul FDTD fin est le même que celui utilisé dans la seconde étape de la DG-FDTD classique (figure 3.1), à l'exception faite qu'elle soit excitée par la source électrique localisée  $\vec{J}_R(\vec{r}_{out})$ . Au cours de cette simulation,  $\{\vec{E}_R; \vec{H}_R\}$  sont enregistrés sur la surface de prélèvement S. Exprimés dans le domaine fréquentiel,  $\vec{J}_R$ ,  $\vec{E}_R$  et  $\vec{H}^R$  sont utilisés pour déterminer les fonctions de transfert comme les relations ci-dessous le montrent.

En guise d'exemple, considérons une face de la surface de prélèvement S. Cette face est discrétisée en M cellules. Toutes ces cellules présentent la même surface élémentaire  $\Delta S$  et le même vecteur unitaire normal  $\vec{n}$ . Les courants sont constants sur chaque cellule, ainsi la partie gauche de l'équation (3.5) devient :

$$\oint_S (\vec{E}^R \cdot \vec{J}_S^{step1} - \vec{H}^R \cdot \vec{M}_S^{step1}) dS = \sum_{i=1}^M \Delta S [\vec{E}^R(\vec{r}_{in_i}) \cdot \vec{J}_S^{step1}(\vec{r}_{in_i}) - \vec{H}^R(\vec{r}_{in_i}) \cdot \vec{M}_S^{step1}(\vec{r}_{in_i})] \quad (3.6)$$

La source  $\vec{J}_R$  est orientée selon  $\vec{e}_u$  et est constante dans la cellule FDTD de volume  $\Delta V$  situé en  $\vec{r}_{out}$ . De ce fait, la partie droite de (3.5) est donnée par :

$$\iiint_V (\vec{E}^{step2} \cdot \vec{J}^R) dV = E_u^{step2}(\vec{r}_{out}) \cdot J_u^R(\vec{r}_{out}) \Delta V \quad (3.7)$$

L'équation 3.5 devient :

$$\sum_{i=1}^M \Delta S [\vec{E}^R(\vec{r}_{in_i}) \cdot \vec{J}_S^{step1}(\vec{r}_{in_i}) - \vec{H}^R(\vec{r}_{in_i}) \cdot \vec{M}_S^{step1}(\vec{r}_{in_i})] = E_u^{step2}(\vec{r}_{out}) \cdot J_u^R(\vec{r}_{out}) \Delta V \quad (3.8)$$

En combinant (3.3), (3.4), (3.8) et en identifiant l'expression obtenue de  $E_u^{step2}(\vec{r}_{out})$  avec 3.1, on arrive aux calculs des fonctions de transfert donnés par :

$$\vec{F}_u^E(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in_i}) = -\frac{\Delta S}{\Delta V} \frac{\vec{n} \wedge \vec{H}^R(\vec{r}_{in_i})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (3.9)$$

$$\vec{F}_u^H(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in_i}) = -\frac{\Delta S}{\Delta V} \frac{\vec{n} \wedge \vec{E}^R(\vec{r}_{in_i})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (3.10)$$

Une simulation FDTD fine du problème réciproque permet de déterminer les fonctions de transfert  $\{\vec{F}_u^E(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in_i}); \vec{F}_u^H(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in_i})\}$ .



### 3.3.1.2 Calcul des fonctions de transfert $\tilde{G}_u^E$ et $\tilde{G}_u^H$

La même démarche est appliquée pour le calcul des fonctions de transfert permettant de déterminer la composante de champ  $H_u^{step2}(\vec{r}_{out})$ . La détermination des fonctions de transfert  $\tilde{G}_u^E$  et  $\tilde{G}_u^H$  passe aussi par l'utilisation d'un problème réciproque. Une source  $\vec{M}^R$  est localisée au point de sortie  $\vec{r}_{out}$  générant un champ  $\{\vec{E}^R; \vec{H}^R\}$  sur les N cellules de la surface S. L'application du principe de réciprocité, dans ce cas de figure, est donnée par l'équation :

$$\oint_S (\vec{E}^R \cdot \vec{J}_S^{step1} - \vec{H}^R \cdot \vec{M}_S^{step1}) dS = \iiint_V (-\vec{H}^{step2} \cdot \vec{M}^R) dV \quad (3.11)$$

La résolution de 3.11 donne de manière analogue à la section précédente, l'équation :

$$\sum_{i=1}^M \Delta S [\vec{E}^R(\vec{r}_{in_i}) \cdot \vec{J}_S^{step1}(\vec{r}_{in_i}) - \vec{H}^R(\vec{r}_{in_i}) \cdot \vec{M}_S^{step1}(\vec{r}_{in_i})] = -H_u^{step2}(\vec{r}_{out}) \cdot M_u^R(\vec{r}_{out}) \Delta V \quad (3.12)$$

Dès lors en combinant (3.3), (3.4), et (3.12), il est possible de déterminer les fonctions de transfert pour déterminer  $H_u^{step2}(\vec{r}_{out})$  :

$$\tilde{G}_u^E(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in_i}) = \frac{\Delta S}{\Delta V} \frac{\vec{n} \wedge \vec{H}^R(\vec{r}_{in_i})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (3.13)$$

$$\tilde{G}_u^H(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in_i}) = \frac{\Delta S}{\Delta V} \frac{\vec{n} \wedge \vec{E}^R(\vec{r}_{in_i})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (3.14)$$

L'annexe B donne l'ensemble des fonctions de transfert pour toutes les faces de la cage d'excitation.

### 3.3.2 Procédure de détermination du modèle de substitution

La mise en application de la méthode MM-DG-FDTD commence par la construction du modèle dans une étape initiale nommée "pré-étape". Cette procédure s'exécute en deux phases :

- 1<sup>re</sup> phase : lancement des simulations réciproques et récupération des champs adéquats sur la surface de prélèvement S. Ces champs sont déterminés pour les fréquences souhaitées grâce à une transformée de Fourier de type FFT<sup>2</sup>.

---

2. Fast Fourier Transform

- 2<sup>e</sup> phase : calcul des fonctions de transfert pour un ou plusieurs points de fréquence à partir des valeurs des champs récupérées et les équations 3.9, 3.10, 3.13 et 3.14.

Par exemple, la détermination de la composantes en sortie  $E_x^{step2}(\vec{r}_{out})$  à la fréquence  $f_0$  nécessite l'exécution de la simulation du problème réciproque avec une source  $J_x^R(\vec{r}_{out})$ . Les fonctions de transfert à la fréquence  $f_0$  sont calculées et utilisables pour tout champ incident  $\{\vec{E}^{step1}; \vec{H}^{step1}\}$ .

### 3.3.3 Synthèse de l'algorithme global de la MM-DG-FDTD

En résumé, l'application de la méthode MM-DG-FDTD suit une procédure en deux temps. La figure 3.4 confronte l'utilisation de cette nouvelle méthode par rapport à l'utilisation classique de la DG-FDTD sur un même problème.

Dans un premier temps, une pré-étape est nécessaire afin de construire le modèle de substitution. Cette étape donne les fonctions de transfert nécessaires à l'insertion du modèle durant la dernière étape.

Dans un second temps, une simulation FDTD grossière de l'ensemble du problème est effectuée. La surface de prélèvement paramétrée autour de l'objet d'étude récolte les champs incidents qui sont traités par une FFT à la fréquence d'étude. Cette première étape a donc pour but de fournir les entrées du modèle inséré par la suite. Ce modèle est lancé dans une dernière étape afin de fournir la valeur du champ électromagnétique en sortie :

- $E_u^{step2}(\vec{r}_{out})$  est déterminé en réponse à tout champ incident  $\{\vec{E}^{step1}; \vec{H}^{step1}\}$  à l'aide de (3.1) et des fonctions de transfert (3.9) et (3.10)
- $H_u^{step2}(\vec{r}_{out})$  est déterminé en réponse à tout champ incident  $\{\vec{E}^{step1}; \vec{H}^{step1}\}$  à l'aide de (3.2) et des fonctions de transfert (3.13) et (3.14).

L'étude d'une nouvelle position de l'objet dans l'environnement impose le lancement de la simulation grossière ainsi que le modèle de substitution.

## 3.4 Validation du modèle de substitution

Afin de valider le principe du MM-DG-FDTD, il est d'abord indispensable de valider le bon fonctionnement du modèle de substitution seul. Pour cela, deux cas canoniques sont proposés. La variabilité n'est pas considérée dans

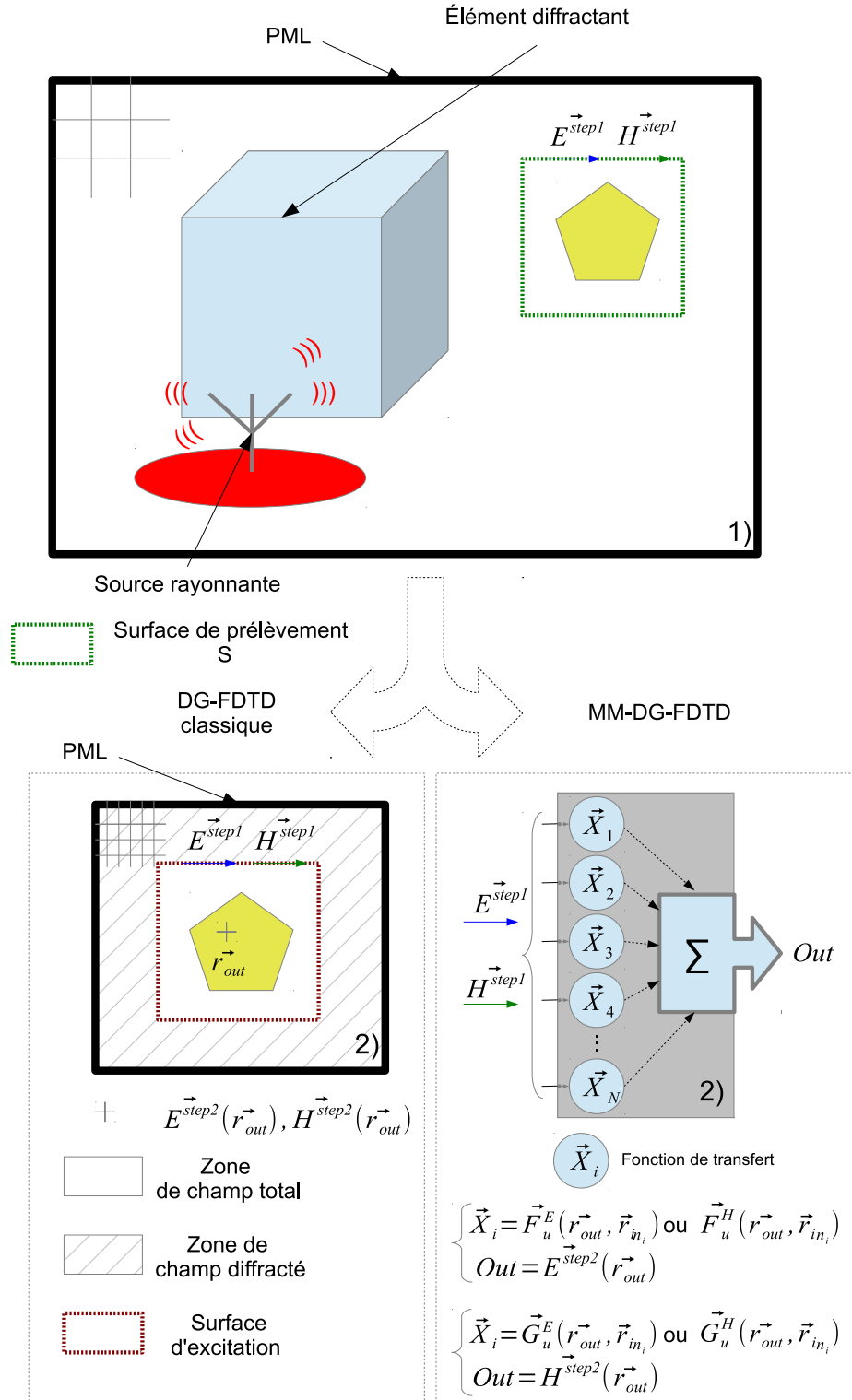


FIGURE 3.4 – Application de la DG-FDTD classique et de la MM-DG-FDTD sur le problème.

le cadre de cette validation. De même, les deux études ne présentent pas de contraste d'échelle, elles sont simulées avec une grille de maillage uniforme.

### 3.4.1 Validation n°1 : estimation du champ électrique dans un bloc diélectrique

#### Présentation du problème

Ce premier problème canonique est présenté sur la figure 3.5. Un volume est éclairé par une onde plane polarisée suivant la direction  $z$ , d'amplitude 10 V/m et qui se propage dans la direction  $x$ . L'excitation couvre la bande de fréquence de [5-115] MHz. L'étude de ce cas est effectuée sur cette plage de fréquence avec un pas de 10 MHz, ce qui correspond à 12 points de calcul. Un bloc diélectrique de dimension 32 mm  $\times$  32 mm  $\times$  32 mm est placé dans la boîte de simulation. Il possède les mêmes caractéristiques électriques que le modèle de corps humain Hugo à la fréquence de 60 MHz (annexe C). L'objectif de cette étude est d'estimer la valeur des trois composantes du champ électrique sur toute la bande d'étude pour un point d'indice (25;25;7) situé à l'intérieur du bloc diélectrique. Pour cela, nous utilisons le modèle de substitution et comparons les valeurs obtenues à celles issues d'une simulation FDTD de référence.

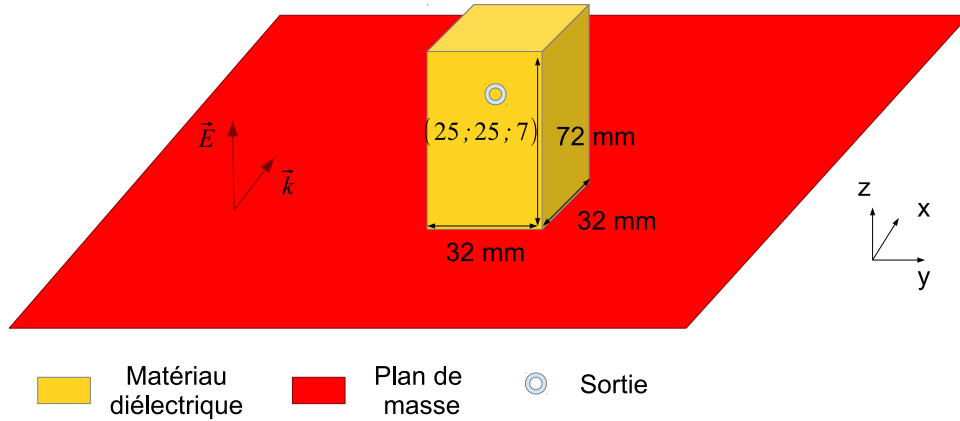


FIGURE 3.5 – Validation du modèle de substitution : présentation du cas canonique n°1.

	FDTD 1 <sup>re</sup> étape
Pas spatiaux $dx = dy = dz$	8 mm
Pas temporel $dt$	14,626 ps
Observation $T_{\text{obs}}$	200 ns
Volume FDTD $N_x \times N_y \times N_z$	$50 \times 50 \times 30$

TABLE 3.1 – Paramètres de la configuration FDTD pour la simulation du premier cas canonique.

### Configuration de simulation

L'exploitation du modèle de substitution est effectuée en deux temps comme nous le montre la figure 3.6. Dans un premier temps, le modèle de substitution est construit afin de pouvoir fournir en sortie la valeur des trois composantes du champ électrique. Pour cela, trois simulations du problème réciproque alimentées successivement par les sources  $J_x^R(\vec{r}_{out})$ ,  $J_y^R(\vec{r}_{out})$  et  $J_z^R(\vec{r}_{out})$  [4] sont menées. Ces sources sont alimentées par une excitation de type gaussienne de fréquence maximale 150 MHz et modulées en sinus à la fréquence de 60 MHz. L'ensemble des fonctions de transfert nécessaires à la résolution de ce cas est déterminé à la suite de ces simulations pour 10 points de fréquence.

Dans un second temps, la simulation FDTD du problème est lancée. Une surface de prélèvement est définie autour du bloc diélectrique fournissant les entrées ( $E_u^{step1}$  et  $H^{step1}$ ) de notre modèle. Ce dernier donne la valeur des champs électromagnétiques pour un point de fréquence, il est donc nécessaire de réitérer l'usage de ce modèle pour tous les points de fréquence. Le tableau 3.1 donne les paramètres de simulation pour la FDTD de référence.

### Résultats

Nous proposons de comparer les résultats obtenus en calculant la différence relative entre les champs électriques de la façon suivante :

$$\Delta E_u(f) = \left| \frac{E_u^{subs}(f) - E_u^{FDTD}(f)}{E_u^{FDTD}(f)} \right| \%$$

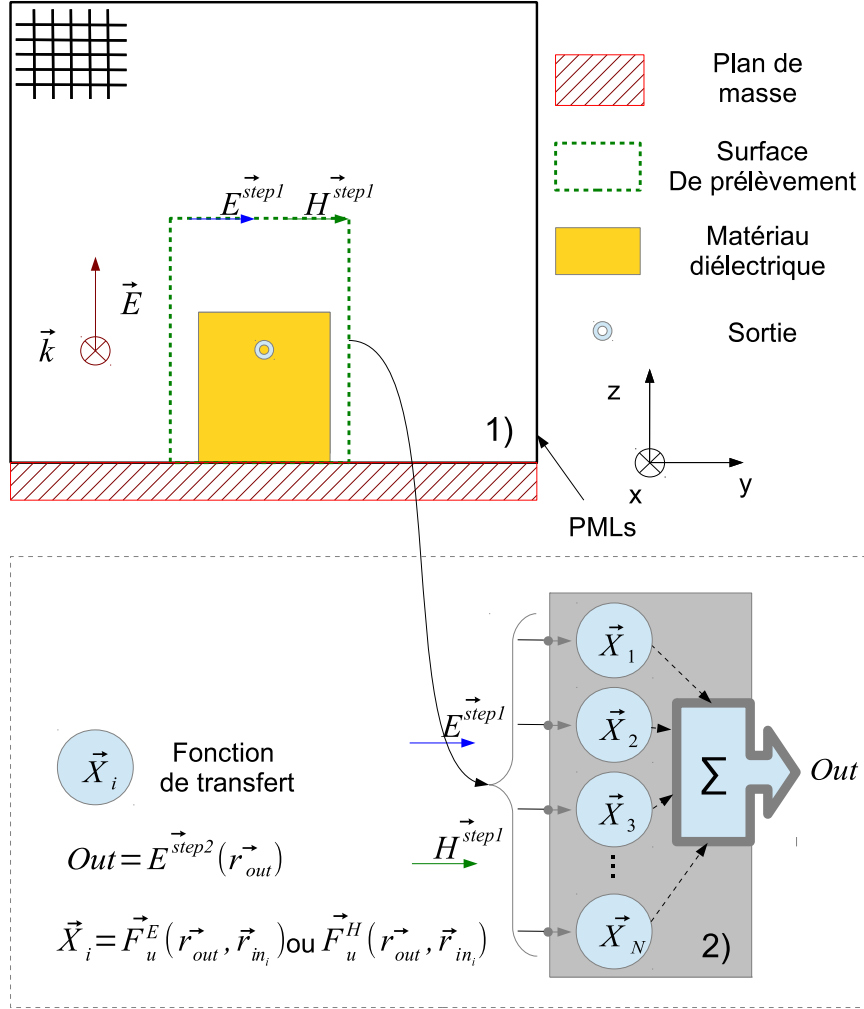


FIGURE 3.6 – Validation du modèle de substitution : application du modèle de substitution dans le cas canonique n°1.

avec :

- $u = x, y \text{ or } z$ ,
- $E_u^{subs}$  représente le résultat obtenu avec le modèle de substitution,
- $E_u^{FDTD}$  représente le résultat obtenu avec la simulation FDTD.

La figure 3.7 présente l'évolution de la différence relative pour les trois composantes du champ électrique en fonction de la fréquence. On observe que pour les trois composantes de champ, les différences relatives restent inférieures à 2% sur toute la bande d'étude. Cette erreur relative s'explique par les diffé-

rences des traitement numériques mises en œuvre dans les deux méthodes. La simulation de référence fournit la valeur du champ électrique à partir d'une simulation FDTD classique et d'un passage en fréquence. Le modèle de substitution détermine le résultat à partir de champs provenant d'une surface de prélèvement, transformés dans le domaine fréquentiel et multipliés par des fonctions de transfert issues du problème réciproque. Les fonctions de transfert sont elles-mêmes calculées avec une autre simulation FDTD et deux FFT, l'une pour la source et l'autre pour les champs prélevés dans la pré-étape.

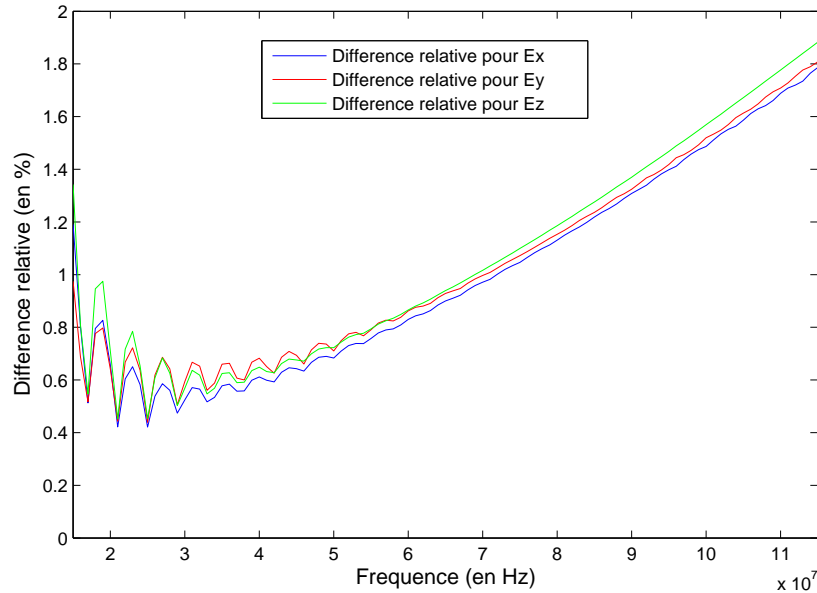


FIGURE 3.7 – Validation du modèle de substitution : différence relative entre la FDTD et le modèle de substitution pour le cas n°1.

En conclusion de cette étude, le modèle de substitution est tout à fait adapté dans un contexte de dosimétrie afin de donner la valeur du champ électrique en un point du modèle de corps. Son application dans ce contexte passe par la construction du modèle obtenu à la suite de trois simulations afin de déterminer les trois composantes du champ électrique.

### 3.4.2 Validation n°2 : Étude d'une transmission entre deux antennes filaires

#### Présentation du problème

Le second cas canonique propose de traiter un problème de transmission entre antennes. Le problème est présenté à la figure 3.9. Deux antennes filaires adaptées à la fréquence de 1,2 GHz sont éloignées d'une distance de 113 mm ( $2.21 \times \lambda_{1,2 \text{ GHz}}$ ). Le générateur de tension de l'émetteur fournit un signal de 10 V d'amplitude maximale. L'étude est menée pour la bande [0,6-2,4] GHz avec un pas de 100 MHz. L'objectif de cette étude est d'estimer la valeur du coefficient de transmission sur toute la bande d'étude grâce au modèle de substitution.

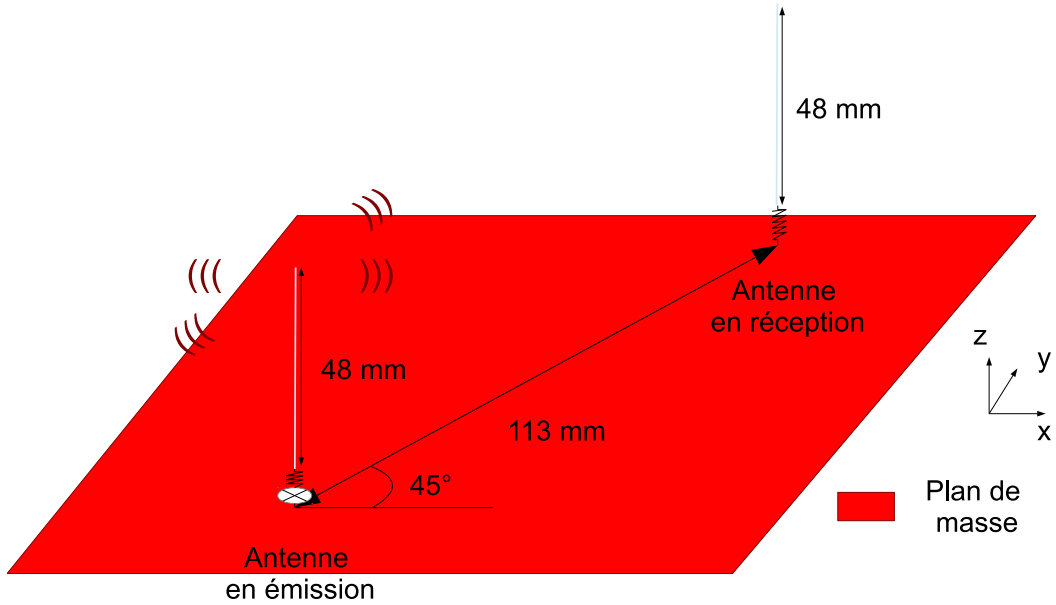


FIGURE 3.8 – Validation du modèle de substitution : présentation du cas canonique n°2.

#### Configuration de simulation

La figure 3.9 illustre l'utilisation du modèle de substitution dans cette étude. De manière similaire au cas canonique précédent, l'exploitation du modèle de substitution est amorcée par sa construction. Comme nous le montre l'équa-



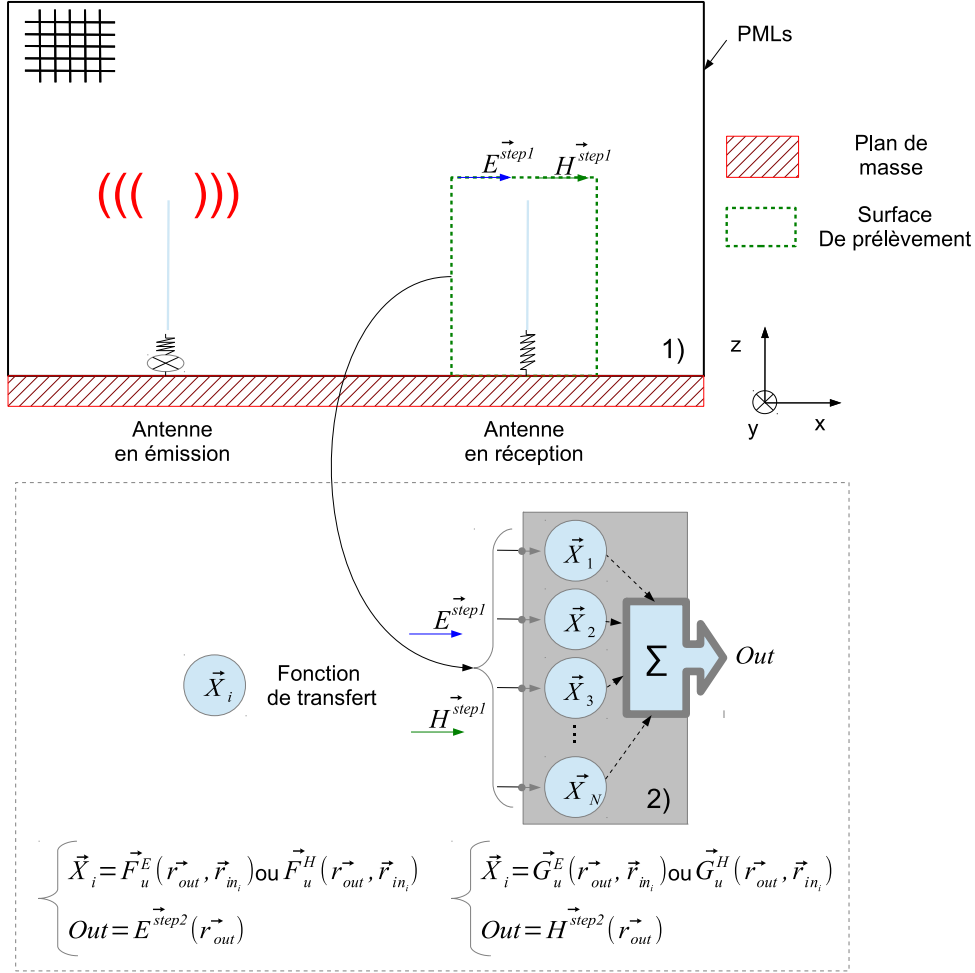


FIGURE 3.9 – Validation du modèle de substitution : application du modèle de substitution dans le cas canonique n°2.

tion 2.12 du chapitre 2, la détermination du coefficient de transmission nécessite la valeur du courant et de la tension aux bornes du dipôle de l'antenne en réception. La tension est donnée par l'intégration du champ électrique sur l'arête FDTD (équation 2.6), l'estimation de la composante du champ  $E_z(\vec{r}_{out})$  au borne de la charge adaptée est donc nécessaire. Le courant est obtenu en calculant la circulation du champ magnétique autour de cette même arête (équation 2.7). Deux composantes de champ  $H_x$ , ainsi que deux composantes de champ  $H_y$  sont à déterminer. Ainsi, il faut lancer cinq simulations du problème réciproque avec une source  $J_z^R$ , deux sources  $M_x^R$  et deux sources  $M_y^R$  [4] dans le but de déterminer toutes les fonctions de transfert nécessaires.

Toutes ces sources sont alimentées par une excitation de type gaussienne de fréquence maximale 2,4 GHz et modulées en sinus à la fréquence de 1,2 GHz. Une fois le modèle construit, une simulation FDTD du problème est lancée. Les données d'entrées du modèle sont fournies grâce à la surface de prélèvement, placée dans cette simulation. Les mêmes configurations de simulation présentées dans le tableau 3.2 sont utilisées dans cette étude. Les résultats obtenus avec le modèle de substitution sont comparés à ceux d'une simulation FDTD de référence.

	FDTD 1 <sup>re</sup> étape
Pas spatiaux $dx = dy = dz$	8 mm
Pas temporel $dt$	0,54848 ps
Observation $T_{\text{obs}}$	10 ns
Volume FDTD $N_x \times N_y \times N_z$	$50 \times 50 \times 40$

TABLE 3.2 – Paramètres de la configuration FDTD pour la simulation du second cas canonique.

## Résultats

Nous proposons de comparer les résultats obtenus en calculant la différence relative de façon similaire à ce qui a été fait dans l'étude précédente (équation 3.15). La figure 3.10 présente les différences relatives pour les cinq valeurs de champs nécessaires au calcul du coefficient de transmission. A la vue des résultats, le modèle de substitution fournit des résultats avec une erreur inférieure à 2% sur toute la bande d'étude.

La précision de l'approche est maintenant évaluée en terme de coefficient de transmission. L'erreur  $\Delta S_{21}(f)$  est donnée par l'équation :

$$\Delta S_{21}(f) = \left| \frac{S_{21}^{subs}(f) - S_{21}^{FDTD}(f)}{S_{21}^{FDTD}(f)} \right| \%$$

avec :

- $S_{21}^{subs}$  représente le résultat obtenu avec le modèle de substitution,
- $S_{21}^{FDTD}$  représente le résultat obtenu avec la simulation FDTD.

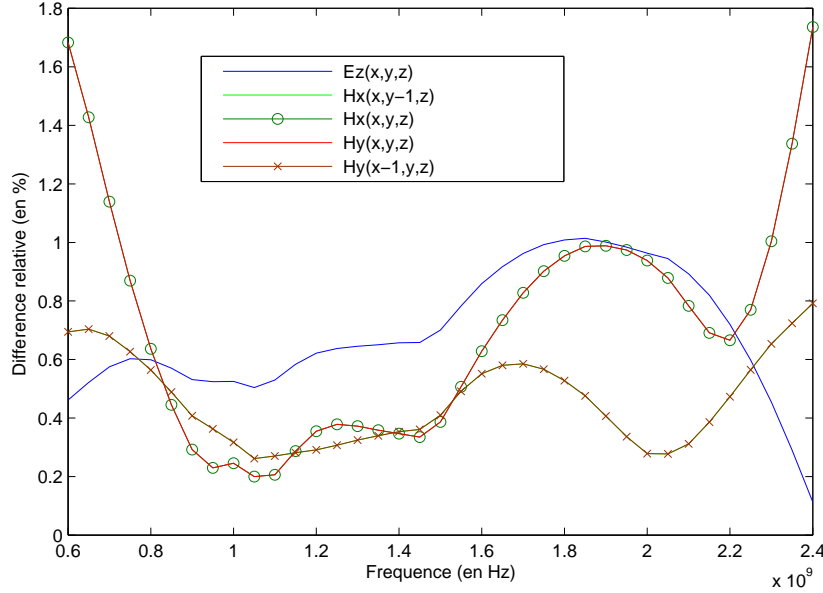
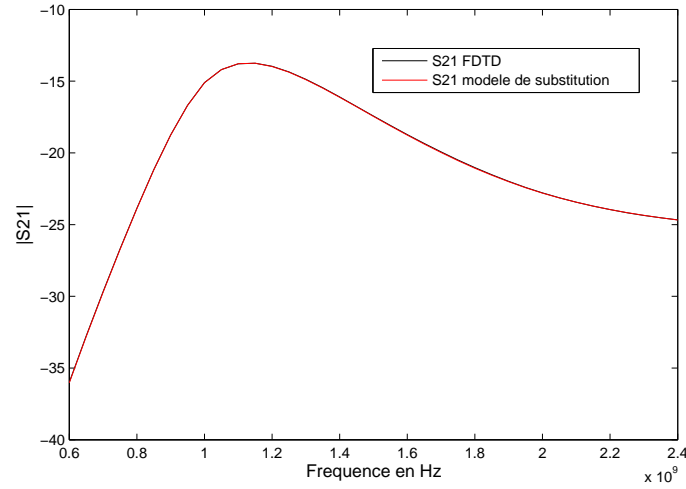


FIGURE 3.10 – Validation du modèle de substitution : différence relative entre la FDTD et le modèle de substitution pour le calcul de champ dans le cas n°2.

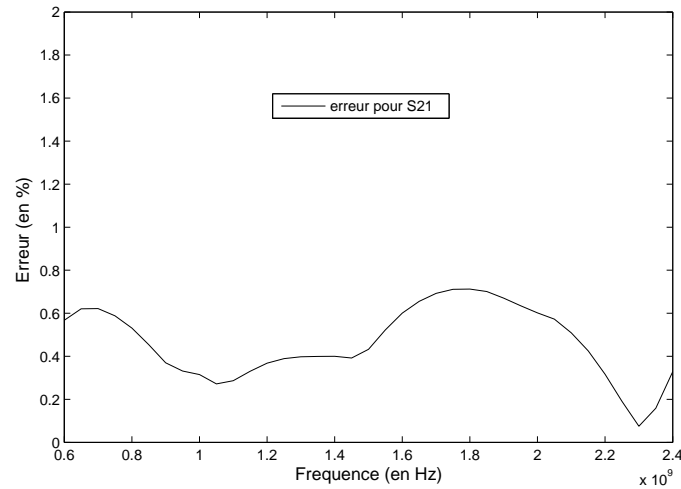
La figure 3.11a montre l'évolution du paramètre  $S_{21}$  en fonction de la fréquence dans la bande d'étude tandis que la figure 3.11b expose l'erreur  $\Delta S_{21}(f)$  associée à ces deux méthodes. L'erreur obtenue est inférieure à 1% sur toute la bande d'étude. Ainsi, ce modèle de substitution est aussi tout à fait exploitable dans un contexte mettant en jeu des antennes. Il nécessite cependant une pré-étape de cinq simulations afin de déterminer toutes les fonctions de transfert nécessaires au calcul du paramètre  $S_{21}$ .

### 3.4.3 Conclusion

Ces deux cas ont permis de valider le modèle de substitution dans les deux contextes abordés par cette thèse. L'approche a été validée dans deux simulations simples sans présence de problème multi-échelle. Les résultats montrent que le modèle utilisé fournit la valeur des champs électromagnétiques avec une bonne précision. La section suivante présente la combinaison de ce modèle avec la DG-FDTD. Cette association permettra la résolution de problèmes variables et multi-échelles.



(a)  $S_{21}$  du problème sélectionné.



(b) Différence relative entre la FDTD et le modèle de substitution.

FIGURE 3.11 – Validation du modèle de substitution : estimation du coefficient de transmission  $S_{21}$  dans le cas n°2.

### 3.5 Validation de la MM-DG-FDTD

Maintenant que le modèle de substitution est validé dans un cas sans contraste d'échelle, passons à la résolution de problèmes intégrant l'aspect multi-échelle. Cette section s'intéresse à la validation de la MM-DG-FDTD, combinaison de la DG-FDTD avec le modèle de substitution validé aupara-

vant. Cette validation se fait par la résolution de deux cas et en confrontant les résultats obtenus à ceux fournis par la DG-FDTD. Afin d'évaluer correctement cette nouvelle extension, nous proposons d'abord une étude sur la précision des résultats. Une seconde étude mettant l'accent sur la comparaison des temps de calcul permettra de mettre en avant les performances de la MM-DG-FDTD dans une problématique variable.

### 3.5.1 Validation n°1 : estimation du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain

#### Présentation du problème

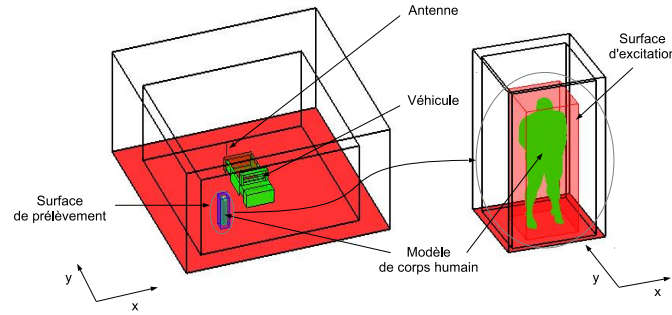
Le premier problème proposé correspond à l'étude présentée dans le paragraphe 2.4 du chapitre 2. Les figures 3.12a et 3.12b présentent le problème pour deux positions différentes du corps vis-à-vis du véhicule. L'objectif de cette étude est d'estimer le champ électrique au centre de l'œil pour ces deux positions à la fréquence de 60 MHz. Pour cela, la résolution du problème est faite grâce à l'application de la DG-FDTD classique et de la MM-DG-FDTD.

#### Configuration de simulation

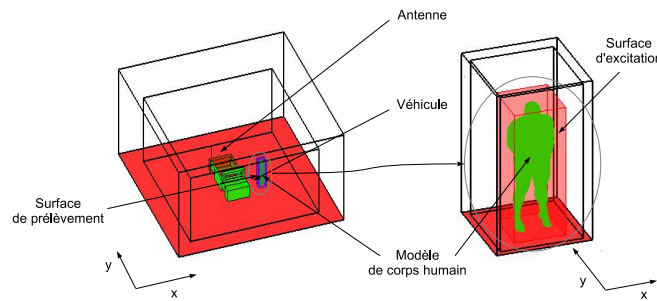
L'utilisation des deux méthodes est présentée dans la figure 3.13. Comme exposé dans le cas canonique n°1, les fonctions de transfert calculées pour un point de mesure ( $f=60$  MHz) sont obtenues grâce à trois simulations du problème réciproque présenté à la figure 3.14. Les sources  $J_x^R(\vec{r}_{out})$ ,  $J_y^R(\vec{r}_{out})$  et  $J_z^R(\vec{r}_{out})$  sont placées au centre de l'œil gauche. À la suite de ces simulations, Les fonctions de transfert sont utilisées afin de déterminer la valeur du champ électrique pour les deux positions du corps. Les résultats en termes de précision et de temps de calculs obtenus avec la MM-DG-FDTD sont comparés à la méthode de référence DG-FDTD.

#### Résultats

La précision des résultats est présentée dans le tableau 3.3. Ce dernier montre que la MM-DG-FDTD produit des résultats précis pour les deux positions. Cette différence relative n'excède pas 1,2%. Ainsi, le modèle peut remplacer l'étape représentant de manière fine le modèle de corps humain Hugo et four-



(a) Position n°1.



(b) Position n°2.

FIGURE 3.12 – Validation de la MM-DG-FDTD : présentation du problème d'estimation du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain pour deux positions.

nir une estimation précise de la valeur du champ électrique en un point de l'œil.

Le tableau 3.4 présente les temps de simulations pour la construction du modèle de substitution. Le tableau 3.5 compare les temps de calcul pour les deux méthodes utilisées. Comme observée dans le chapitre précédent, la simulation d'une position complète avec la DG-FDTD classique nécessite un temps de 357,04 min notamment dû à la simulation fine. La MM-DG-FDTD requiert tout d'abord une pré-étape simulant trois fois en description fine notre modèle de corps humain. Ce coût, préalable de 748 min, est indispensable à la construction du modèle de substitution. Cependant, la simulation de la deuxième étape met désormais un temps de 0,2 min. Une fois le modèle construit, l'étude d'une nouvelle position exige seulement le lancement de la

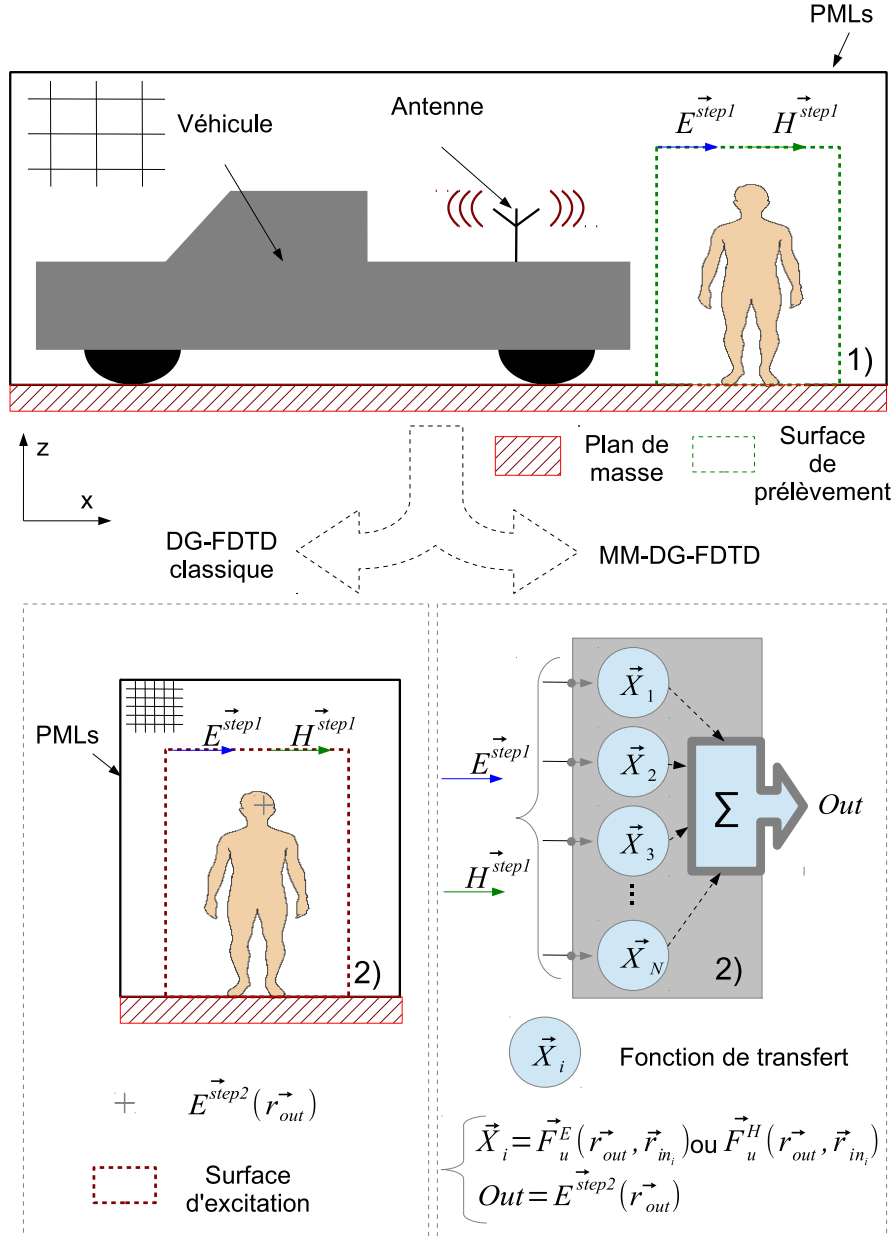


FIGURE 3.13 – Application de la DG-FDTD classique et de la MM-DG-FDTD sur le problème d'estimation du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain.

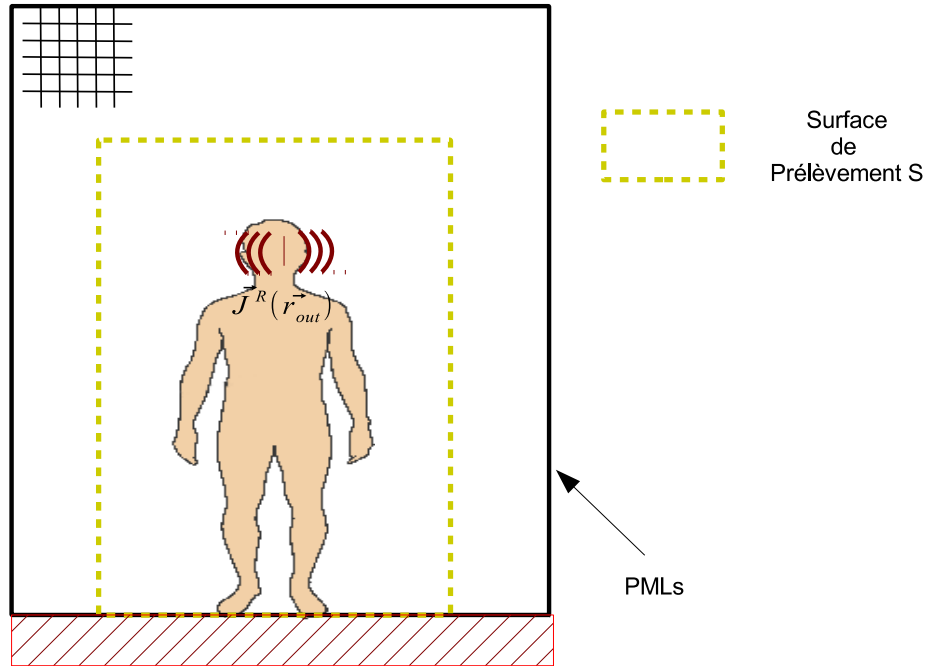


FIGURE 3.14 – Application de la MM-DG-FDTD pour le problème d'estimation du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain : pré-étape.

$f = 60\text{MHz}$	Position n°1	Position n°2
$ E_x $	0,8526 %	0,44693 %
$ E_y $	0,48189 %	1,1998 %
$ E_z $	0,89392 %	0,17601 %
$ E_{total} $	0,73927 %	0,38439 %

TABLE 3.3 – Différence relative entre la DG-FDTD et la MM-DG-FDTD pour les deux positions dans le problème d'estimation du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain.

1<sup>re</sup> étape (0,56 min) et l'utilisation du modèle de substitution pour un coût total de seulement 0,76 min. En observant ces temps de calcul, il est à noter que la MM-DG-FDTD ne montre son intérêt qu'à partir d'un nombre suffisant de positions. Pour obtenir le champ électrique en un point de l'œil, cette méthode devient intéressante à partir de 3 positions du corps à étudier.



	Pré-étape
Simulations FDTD	220 min $\times$ 3
Calcul des fonctions de transfert	88 min
Total	748 min

TABLE 3.4 – Temps de construction du modèle de substitution pour le problème d'estimation du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain.

	DG-FDTD	MM-DG-FDTD
Pré-étape	-	748 min
1 <sup>re</sup> étape	0,56 min	0,56 min
2 <sup>e</sup> étape	356,48 min	0,23 min
Total	357,04 min	748,79 min

TABLE 3.5 – Temps de simulation du problème d'estimation du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain pour les deux méthodes DG-FDTD et MM-DG-FDTD.

### 3.5.2 Validation n°2 : étude d'une transmission entre deux antennes ULB

#### Présentation du problème

Pour cette deuxième validation, le problème considéré correspond à une étude de transmission entre deux antennes ULB<sup>3</sup>. Ce scénario est illustré sur la figure 3.15. L'antenne d'émission délivre une excitation gaussienne couvrant la bande [0-14] GHz et l'amplitude maximale du générateur est fixée à 10 V. Les deux antennes sont séparées d'une distance de 20,4 mm ( $0.9533 \times \lambda_{14\text{GHz}}$ ) et placées sur un plan de masse considéré infini. Le volume de calcul possède des dimensions de 72 mm  $\times$  72 mm  $\times$  45 mm, soit pour la plus grande dimension  $3,36 \times \lambda_{14\text{GHz}}$ . Un pas de 100 MHz a été sélectionné afin de couvrir toute la

3. Ultra-Large Bande

bande de fréquence ce qui correspond à 131 points de fréquence. Les objectifs de cette section sont d'évaluer les performances de la MM-DG-FDTD face à la méthode DG-FDTD classique dans un contexte impliquant une transmission entre antennes.

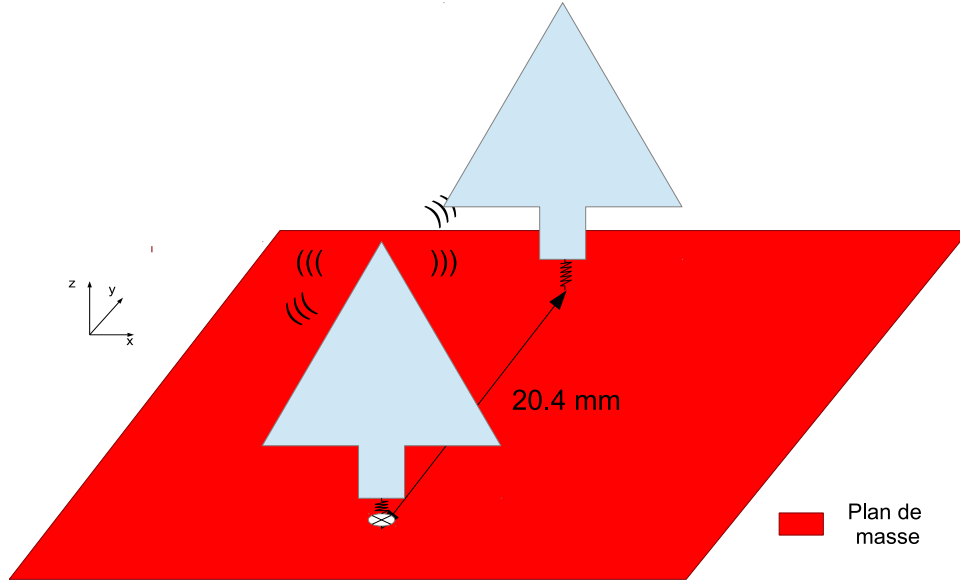


FIGURE 3.15 – Présentation du problème entre deux antennes ULB.

### Antenne ultra-large bande

L'antenne considérée dans cette étude est présentée sur la figure 3.16a. Il s'agit d'un monopôle ULB en forme de diamant, parallèle au plan  $(xOz)$  [12] et disposé sur un plan de masse infini. L'antenne est alimentée avec un générateur d'impédance interne  $50 \Omega$  sur une arête FDTD. Le paramètre en réflexion  $S_{11}$  de l'antenne isolée est représenté sur la figure 3.16b [52]. La bande passante à -10 dB est de 4,9 GHz sur la bande [4,7-9,6] GHz. Les côtés obliques de l'antenne nécessitent un échantillonnage spatial en escalier suffisamment précis afin de garantir une bonne précision pour la détermination des paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$ .

### Configuration de simulation

La résolution de l'étude proposée est effectuée à partir de la méthode DG-

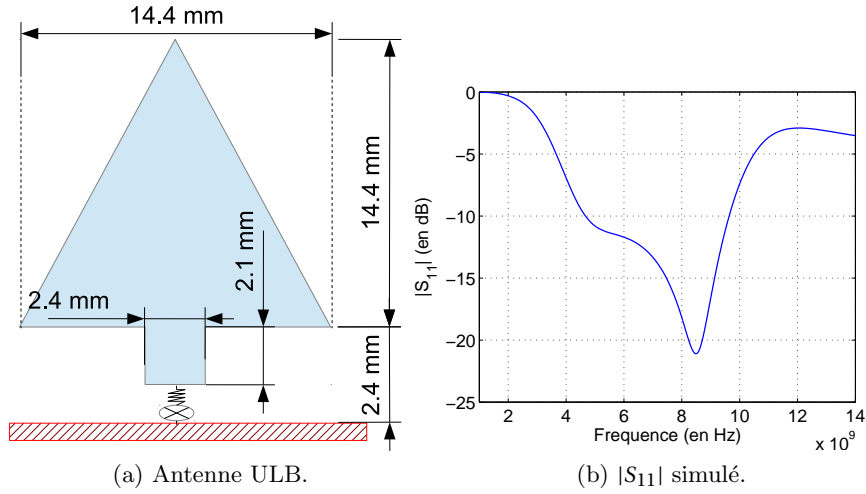


FIGURE 3.16 – Antenne ULB et son coefficient en reflexion simulé.

FDTD bilatérale. En effet, le problème met en scène une transmission entre antennes ULB qui nécessitent une description fine des antennes d'émission et de réception. Le reste de l'environnement est modélisé de manière grossière. Ainsi, à la différence de l'étude précédente, le traitement du problème se fait par trois étapes successives.

La première étape (commune à ces deux méthodes) décrit finement l'antenne ULB d'émission seule. Une résolution de 0,3 mm (soit  $\frac{\lambda_{14\text{GHz}}}{71}$ ) est choisie. Une seconde simulation modélise avec une résolution plus relâchée (1,2 mm soit  $\frac{\lambda_{14\text{GHz}}}{18}$ ) le canal de propagation ainsi que les deux antennes. Pour une application de la DG-FDTD, une troisième et dernière étape décrit l'antenne de réception avec le même niveau de description utilisé lors de la première étape. Pour une application de la MM-DG-FDTD, cette dernière étape est remplacée par un modèle de substitution. Sa construction reprend le principe appliqué dans la résolution du cas canonique n°2. La pré-étape possède les mêmes configurations que l'étape 3 et, elle est illustrée à la figure 3.17. Les fonctions de transfert sont obtenues à la suite des cinq simulations afin de déterminer tous les champs nécessaires à l'estimation du paramètre  $S_{21}$ . L'application des méthodes DG-FDTD et MM-DG-FDTD sur ce problème est présentée sur la figure 3.18, tandis que les configurations de simulation se trouvent dans le tableau 3.6.

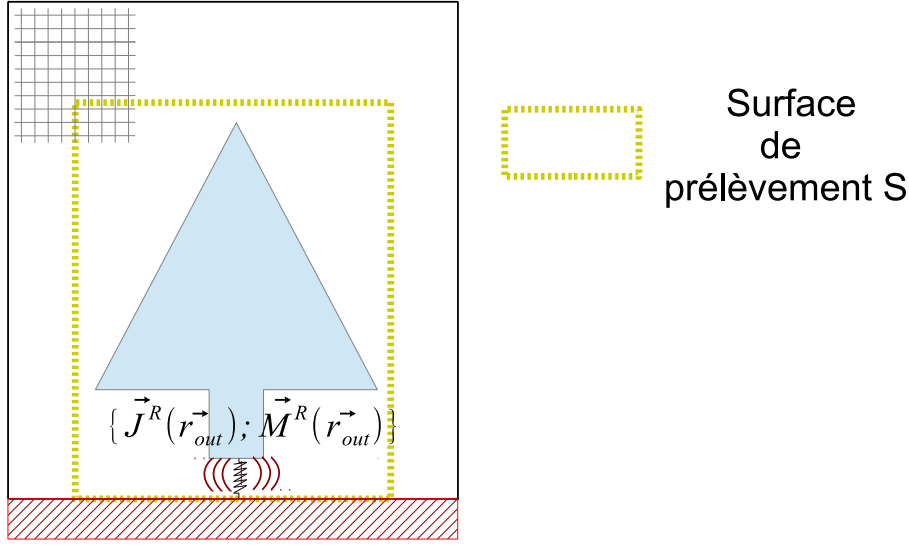


FIGURE 3.17 – Application de la MM-DG-FDTD sur le problème de transmission entre antennes ULB : pré-étape.

	DG-FDTD			
	MM-DG-FDTD			
	Pré-étape	1 <sup>re</sup> étape	2 <sup>e</sup> étape	
Pas spatiaux $dx = dy = dz$	0,3 mm	0,3 mm	1,2 mm	0,3 mm
Pas temporel $dt$	0,18283 ps	0,18283 ps	0,73132 ps	0,18283 ps
Observation $T_{\text{obs}}$	1 ns	1 ns	4 ns	4 ns
Volume FDTD $N_x \times N_y \times N_z$	$128 \times 60 \times 80$	$128 \times 60 \times 80$	$60 \times 60 \times 30$	$128 \times 60 \times 80$

TABLE 3.6 – Paramètres de la configuration DG-FDTD et MM-DG-FDTD pour l'étude de la transmission entre deux antennes ultra-large bande

## Résultats

A l'issue de la troisième étape, les valeurs des champs aux bornes de la charge adaptée pour la DG-FDTD et en sortie du modèle de substitution sont relevées. La figure 3.19 présente l'évolution de la différence relative des champs entre les deux méthodes en fonction de la fréquence. Le modèle fournit des résultats avec une différence relative inférieure à 2% sur toute la bande passante de l'antenne. En bas et haut de bande, les différences relatives augmentent significativement. Cela est dû aux très faibles valeurs des composantes de champ

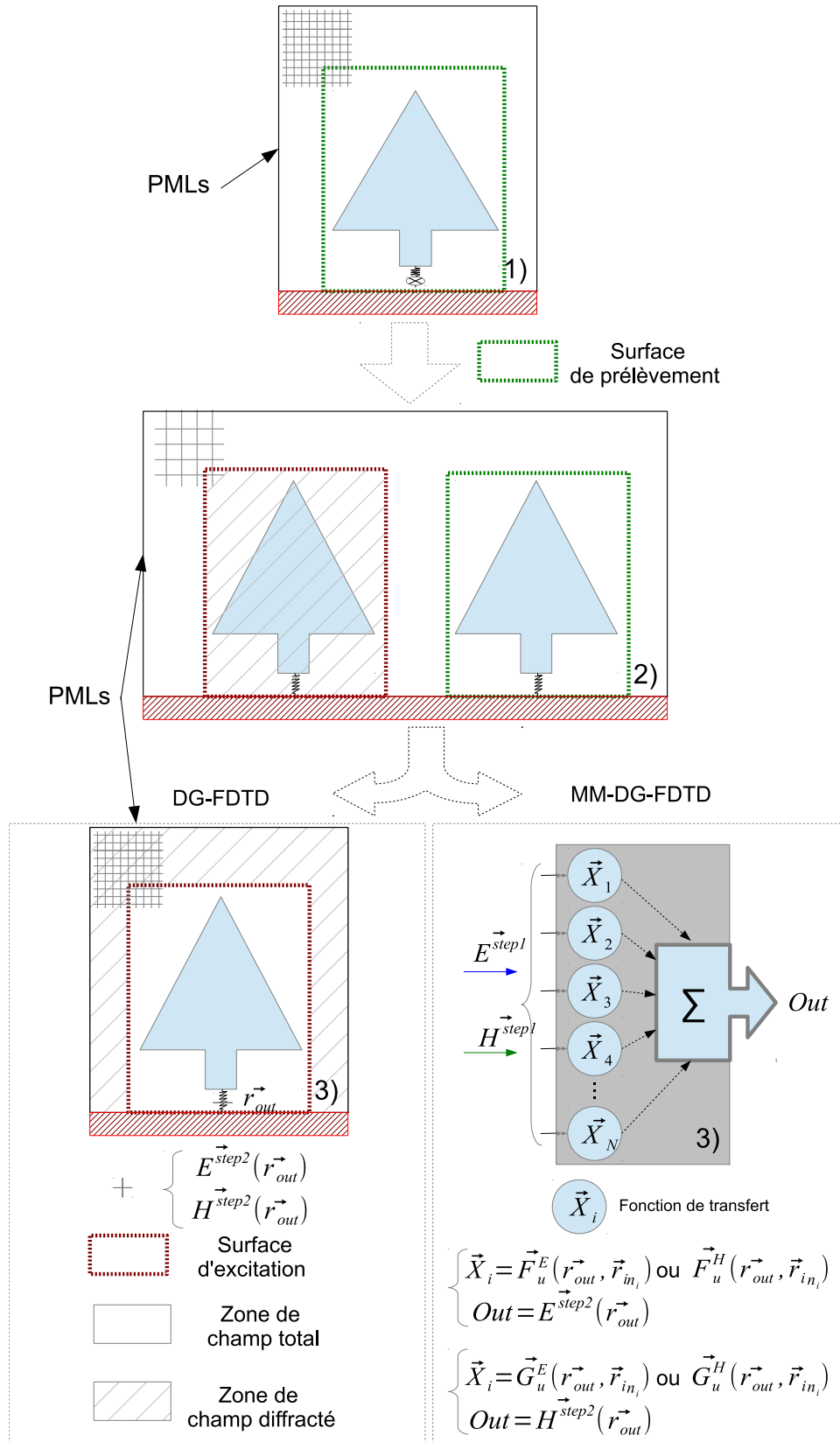


FIGURE 3.18 – Application de la DG-FDTD classique et de la MM-DG-FDTD sur le problème de transmission entre antennes ULB.

considérées

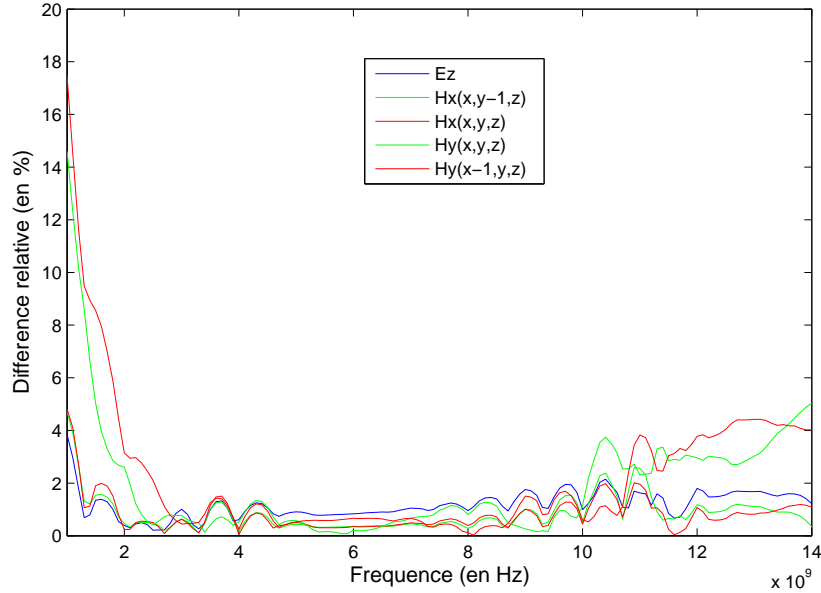
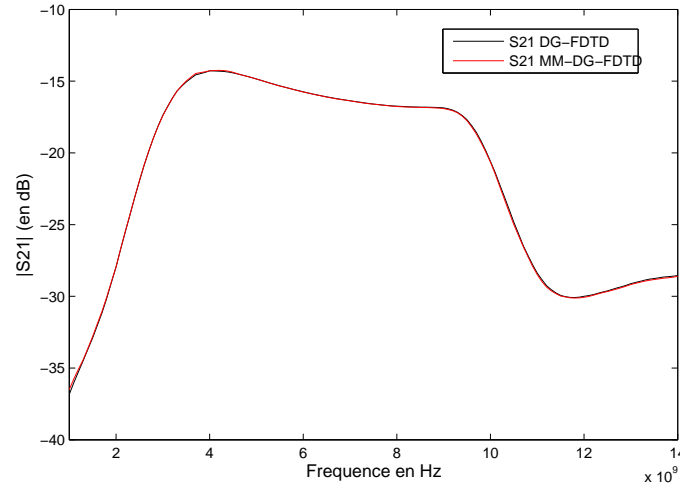


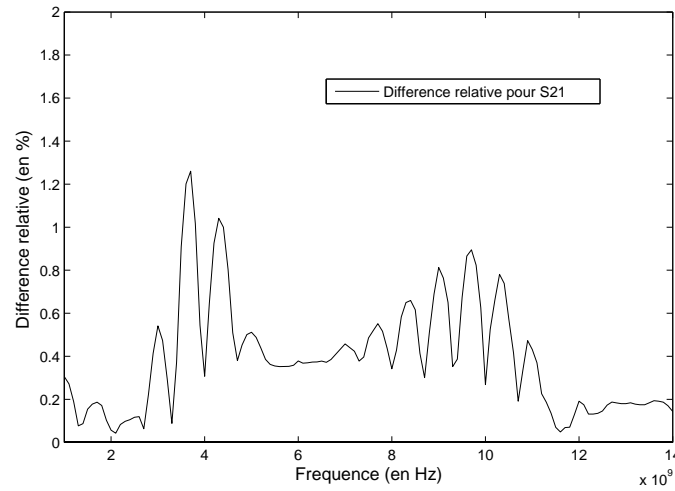
FIGURE 3.19 – Validation de la MM-DG-FDTD : différence relative entre la DG-FDTD et la MM-DG-FDTD pour le calcul des champs dans le problème de transmission entre antennes ULB.

La figure 3.20a expose le paramètre  $S_{21}$  obtenu avec les deux méthodes en fonction de la fréquence tandis que la figure 3.20b présente la différence relative. Ces observations montrent que la MM-DG-FDTD procure une évaluation précise du coefficient de transmission sur toute la bande de fréquence. Ainsi, le modèle remplace avec succès la troisième étape de la DG-FDTD.

Le tableau 3.7 présente les temps de simulation pour la construction du modèle de substitution. Le tableau 3.8 compare les temps de simulation pour les deux méthodes. La simulation de ce cas complet avec la méthode DG-FDTD prend un temps de calcul de 45,87 min tandis que la MM-DG-FDTD a besoin de 591,07 min. Ce dernier temps de calcul se découpe de la façon suivante. La première phase de l'application de la MM-DG-FDTD qui consiste à construire le modèle de substitution nécessite un temps de 556,38 min. Ce temps se justifie par les cinq simulations FDTD lancées et par le calcul de toutes les fonctions de transfert pour les 131 points de fréquence. La 1<sup>re</sup> étape



(a)  $S_{21}$  du problème sélectionné.



(b) Différence relative entre la FDTD et le modèle de substitution.

FIGURE 3.20 – Validation de la MM-DG-FDTD : estimation du coefficient de transmission  $S_{21}$  dans le problème de transmission entre antennes ULB.

et la 2<sup>e</sup> étape sont communes aux deux méthodes. L'insertion en troisième étape du modèle construit permet désormais le lancement de cette étape avec un temps de calcul de 19,65 min alors que la DG-FDTD nécessite un temps de 37,13 min.

Il est important de noter que le temps de simulation de la MM-DG-FDTD

est conditionné par deux facteurs. En effet, le nombre de fonctions de transfert dépend de la bande de fréquence d'étude et du pas fréquentiel. Le caractère ultra large bande des antennes employées dans ce problème pénalise la MM-DG-FDTD. De plus, le pas choisi de 100 MHz donne un nombre de point de fréquence élevé à étudier (131). Dans ces conditions, son exploitation devient intéressante face à la DG-FDTD classique à partir de 32 positions de l'antenne de réception.

	Pré-étape
Simulations FDTD	7,35 min $\times$ 5
Fonction de transfert	3,96 min $\times$ 131
total	555,51 min

TABLE 3.7 – Temps de construction du modèle de substitution pour le problème de transmission entre antennes ULB.

	DG-FDTD	MM-DG-FDTD
Pré-étape	-	555,51 min
1 <sup>re</sup> étape	7,35 min	7,35 min
2 <sup>e</sup> étape	1,41 min	1,41 min
3 <sup>e</sup> étape	37,11 min	0,15 min $\times$ 131 = 19,65
Total	45,87 min	583,92 min

TABLE 3.8 – Temps de simulation du problème de transmission entre antennes ULB pour les deux méthodes DG-FDTD et MM-DG-DTD.

### 3.5.3 Conclusion partielle pour la seconde validation

Cette partie a proposé deux contextes d'application de la MM-DG-FDTD. Deux problèmes résolus précédemment par la DG-FDTD en raison de leur caractère multi-échelle sont cette fois-ci traités par la MM-DG-FDTD. En



comparant les différentes performances obtenues, les résultats nous ont montré que cette nouvelle méthode fournit des résultats rigoureux et précis. Malgré un coût en temps indispensable à la construction du modèle, l'étape substituée est traitée de façon plus rapide. C'est pourquoi, l'intérêt de son exploitation intervient dans des cas d'étude portant sur un nombre suffisant de positions. Ainsi, la MM-DG-FDTD est une méthode clairement axée sur la résolution de cas variables dans un problème multi-échelle.

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle approche basée sur la combinaison de la méthode DG-FDTD et d'un modèle de substitution a été présentée. Elle permet de traiter efficacement un problème multi-échelle et variable.

Le modèle de substitution a tout d'abord été validé sur deux cas cano- niques. Ils permettent tous les deux de vérifier la précision du nouveau modèle en comparant ses résultats avec ceux obtenus par la FDTD classique. Le pre- mier cas consiste à déterminer la valeur du champ électrique à l'intérieur d'un bloc diélectrique soumis à l'excitation d'une onde plane. Ce bloc possède les mêmes propriétés que les tissus humains à la fréquence de 60 MHz. Le second cas propose une étude sur la détermination du paramètre de transmission entre deux antennes filaires. Les conclusions de ces études ont montré que le macro- modèle fonctionne correctement dans les deux contextes sélectionnés dans la thèse en fournissant une bonne précision des résultats sur toute leur bande de fréquence d'étude. Ensuite, la méthode MM-DG-FDTD a été validée sur deux problèmes précédemment résolus par la DG-FDTD classique. Deux études en termes de précision et de temps de calcul ont été proposées ainsi qu'une dis- cussion autour des performances.

Ce chapitre montre que cette nouvelle extension est une méthode simple à mettre en œuvre même si elle rajoute une pré-étape nécessaire. En effet, une fois la construction du modèle de substitution achevée, la MM-DG-FDTD utilise les mêmes étapes, configurations et moyens de transmission de l'infor- mation que la DG-FDTD classique. Le chapitre suivant propose l'exploitation de cette nouvelle approche dans les scénarios sélectionnés dans le chapitre 1. Leur étude, pour un grand nombre de positions est proposée.



## Chapitre 4

# Exemples d'exploitation de la MM-DG-FDTD

---

4.1	Introduction . . . . .	96
4.2	Application dans un problème de dosimétrie : estimation du champ électrique dans l'œil d'un corps humain pour plusieurs positions autour d'un véhicule surmonté d'une antenne . . . . .	96
4.2.1	Présentation du problème . . . . .	97
4.2.2	Configuration de simulation . . . . .	98
4.2.3	Résultats : temps de calcul . . . . .	99
4.2.4	Résultats : valeur du champ électrique pour toutes les positions de l'environnement . . . . .	99
4.2.5	Discussion . . . . .	101
4.2.6	Conclusion partielle sur la 1 <sup>re</sup> exploitation . . . . .	104
4.3	Application dans un problème d'antenne : calcul du coef- ficient de transmission entre antennes ULB dans un grand environnement complexe et variable . . . . .	104
4.3.1	Présentation du problème . . . . .	104
4.3.2	Configuration de simulation . . . . .	106
4.3.3	Résultats : estimation du paramètre $S_{21}$ . . . . .	107
4.3.4	Résultats : temps de calcul . . . . .	107
4.3.5	Seconde étude : nouvelle configuration du problème	110
4.3.6	Conclusion partielle sur la 2 <sup>e</sup> exploitation . . . . .	113
4.4	Conclusion . . . . .	114

---

## 4.1 Introduction

Le chapitre précédent a été consacré à l'exposé du principe de la MM-DG-FDTD ainsi que sa validation dans plusieurs cas simples. Cette nouvelle extension de la FDTD est basée sur l'association de deux méthodes : une approche temporelle multi-échelle, la DG-FDTD, et une approche fréquentielle, le modèle de substitution. Les différentes applications ont montré que cette nouvelle extension de la DG-FDTD présente des aspects intéressants en terme de temps de calcul afin de résoudre le caractère variable présent dans certains problèmes multi-échelles. En effet, une fois le modèle de substitution construit, la simulation de l'étape substituée est exécutée plus rapidement. Cette capacité permet potentiellement de traiter plusieurs positions d'un objet d'étude dans l'environnement.

Ce chapitre s'intéresse à l'exploitation de la MM-DG-DFDTD dans les deux scénarios sélectionnés dans le chapitre 1. Ces scénarios présentent les deux aspects abordés durant cette thèse : un problème multi-échelle couplé à un problème variable. Dans une première partie, le scénario associé à un contexte de dosimétrie est traité. Le but est d'estimer la valeur du champ électrique à l'intérieur de l'œil gauche du modèle de corps humain pour un grand nombre de positions de ce dernier dans l'environnement d'exposition. La seconde partie de ce chapitre propose l'application de la MM-DG-FDTD dans le deuxième scénario s'intéressant à la transmission entre antennes ULB. L'objectif est d'évaluer la valeur du coefficient de transmission pour plusieurs positions de l'antenne en réception dans deux environnements légèrement différents.

## 4.2 Application dans un problème de dosimétrie : estimation du champ électrique dans l'œil d'un corps humain pour plusieurs positions autour d'un véhicule surmonté d'une antenne

Ce premier scénario a été traité avec la DG-FDTD et la MM-DG-FDTD pour deux positions du modèle de corps humain dans l'environnement. Cette étude se situe dans le paragraphe 3.5.1 du chapitre 3. Le champ électrique

à l'intérieur de l'œil gauche de Hugo a été calculé pour les deux positions et les résultats ont montré une bonne concordance des méthodes. La différence relative entre les résultats obtenus pour les deux méthodes est faible sur toute la bande d'étude.

Le premier exemple d'exploitation propose de traiter ce problème de dosimétrie pour un grand nombre de positions du modèle de corps humain autour du véhicule.

#### 4.2.1 Présentation du problème

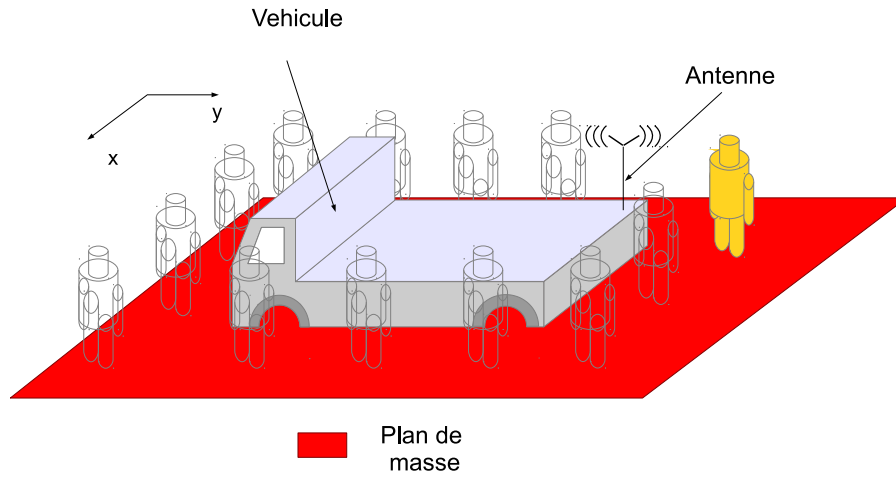


FIGURE 4.1 – Illustration du scénario de dosimétrie pour plusieurs positions.

Le problème est illustré dans la figure 4.1. Les mêmes données que celles du paragraphe 3.5.1 du chapitre 3 sont utilisées pour cette étude. La division de la surface du problème en cellules est présentée dans la figure 4.2. L'ensemble de l'environnement s'étend sur une surface de  $64 \times 64$  cellules tandis que le véhicule prend  $16 \times 34$  cellules. Hugo, orienté suivant la direction -x, occupe un espace de  $2 \times 2$  cellules. Dans cette configuration, le nombre de positions possible de Hugo dans l'environnement est donné par :

$$\frac{64}{2} \times \frac{64}{2} - \frac{16}{2} \times \frac{34}{2} = 888 \quad (4.1)$$

Ainsi, 888 positions sont considérées. L'objectif est d'estimer grâce à la MM-DG-FDTD, la valeur du champ électrique à l'intérieur de l'œil gauche pour toutes les positions et pour une unique orientation de Hugo. Cette étude est effectuée pour une fréquence de 60 MHz et elle est accompagnée d'une étude

sur le temps de calcul. Les temps de calcul entre la DG-FDTD et la MM-DG-FDTD sont comparés.

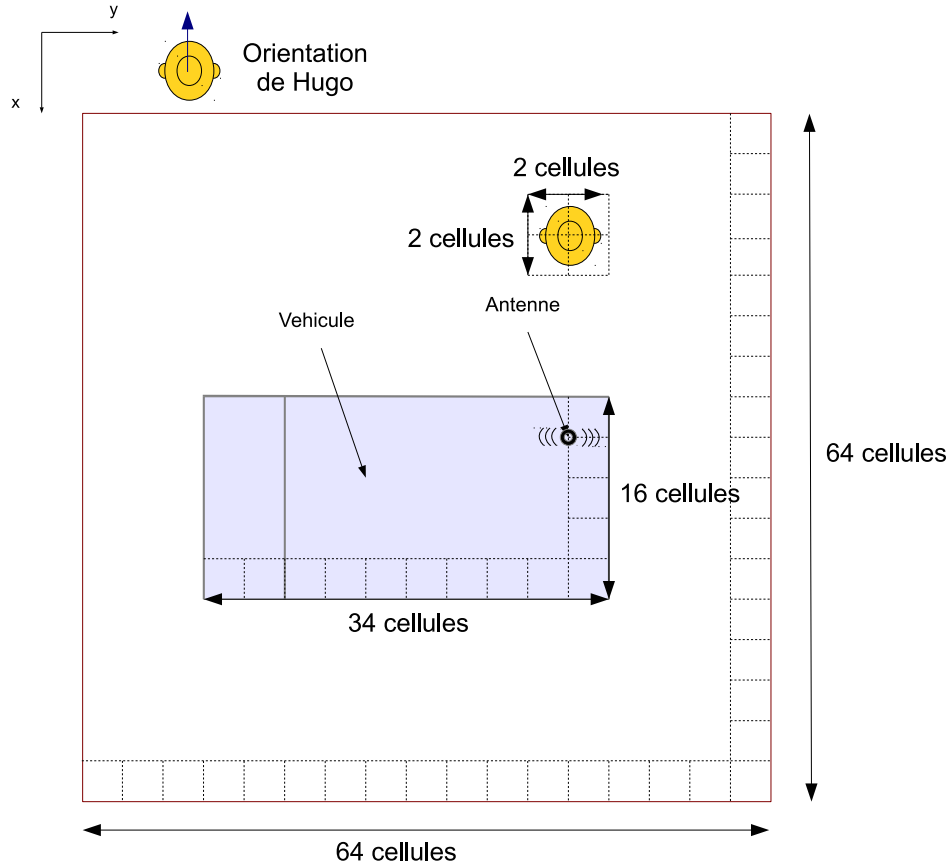


FIGURE 4.2 – Division de la surface du problème de dosimétrie en cellule.

#### 4.2.2 Configuration de simulation

Les simulations pour chacune des étapes de la MM-DG-FDTD sont les mêmes que celles utilisées dans les paragraphes 2.4 et 3.5.1. Ces étapes sont illustrées dans la figure 3.13. Tout d'abord, une pré-étape est lancée afin de construire le modèle de substitution pour calculer rapidement la valeur du champ électrique en un point au centre de l'œil gauche d'Hugo. Ensuite, pour chaque nouvelle position d'Hugo dans l'environnement, une première étape FDTD décrit grossièrement l'ensemble du problème. Pour finir, le champ électrique est fourni grâce à l'utilisation du modèle de substitution en réponse à tout champ incident provenant de la surface de prélèvement autour de Hugo.

Les paramètres diélectriques d'Hugo à la fréquence de 60 MHz sont donnés dans l'annexe C.

### 4.2.3 Résultats : temps de calcul

Le tableau 3.4 présente le temps de calcul de la pré-étape. Un temps incompressible de 748 min est nécessaire afin de construire le modèle de substitution. Le tableau 4.1 présente la comparaison des temps de calcul entre une utilisation de la DG-FDTD et de la MM-DG-FDTD pour  $W$  positions.

W positions	DG-FDTD	MM-DG-FDTD
Pré-étape	-	748 min
1 <sup>re</sup> étape	$0,56 \times W$ min	$0,56 \times W$ min
2 <sup>e</sup> étape	$356,48 \times W$ min	$0,23 \times W$ min
Total	$357,04 \times W$ min	$748 + 0,79 \times W$ min

TABLE 4.1 – Temps de simulation du problème de dosimétrie pour  $W$  positions.

Comme le montre la figure 4.3, la MM-DF-FDTD devient rentable pour une étude portant sur plus de deux positions. Par exemple, une étude portant sur 8 positions nécessite 754,3 min pour la MM-DG-FDTD alors que le DG-FDTD a besoin d'un temps de calcul de 2856 min. L'ensemble de l'étude (888 positions) pour cette première exploitation est exécuté avec un temps de calcul de 1449,5 min pour cette nouvelle approche. Par comparaison, il faudrait 317050 min avec une utilisation classique de la DG-FDTD. On observe clairement que la MM-DG-FDTD offre un gain considérable en terme de temps de calcul comparé à la DG-FDTD.

### 4.2.4 Résultats : valeur du champ électrique pour toutes les positions de l'environnement

La figure 4.4 présente l'orientation spatiale du corps et une cartographie de champ. Cette dernière représente le module du champ électrique au centre de l'oeil gauche pour l'ensemble des 888 positions autour du véhicule. Chaque pixel donne l'amplitude du champ électrique dans l'oeil pour une position

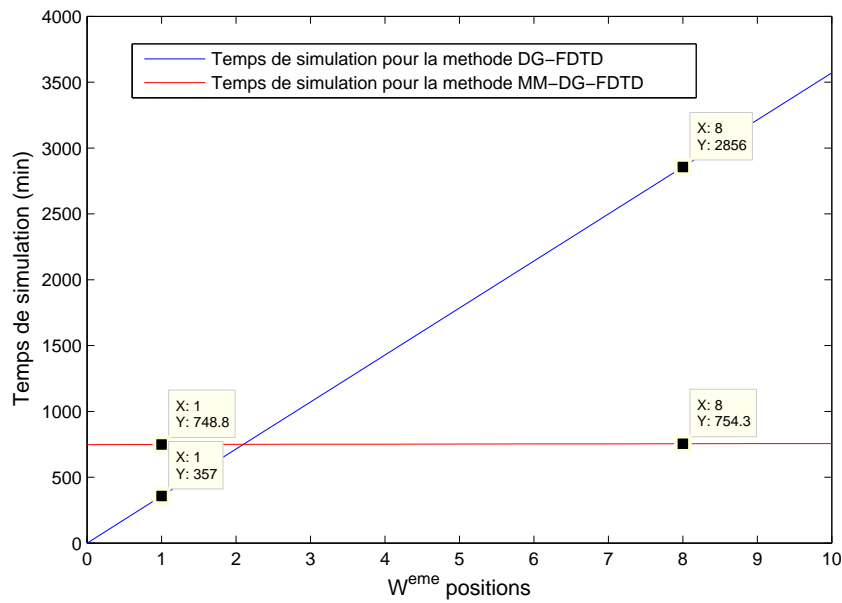


FIGURE 4.3 – Temps de simulation pour les deux méthodes pour la première exploitation.

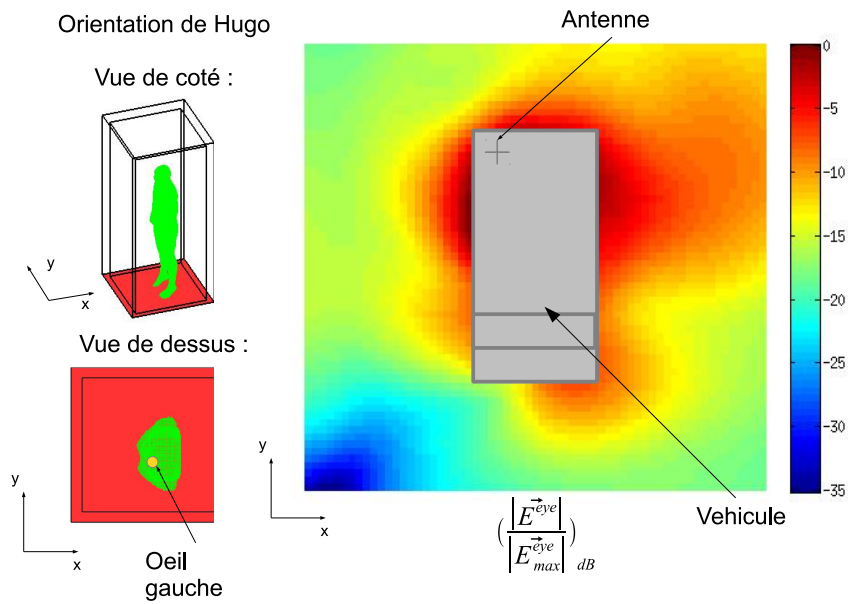


FIGURE 4.4 – Résultats normalisées.

donnée du corps. Pour plus de lisibilité, le corps n'est pas représenté sur cette



cartographie. Elle est normalisée par rapport à son maximum.

Comme cette cartographie le montre, le degré d'exposition est plus intense à proximité de l'antenne et tout autour du véhicule. Un degré élevé d'exposition est relevé en haut à droite de la cartographie tandis que les zones de plus faible d'exposition sont situées en bas à gauche. Au vu de l'orientation de Hugo, ces résultats semblent cohérents.

### 4.2.5 Discussion

#### Étude pour différentes orientations du modèle de corps humain

Dans cette étude, une seule orientation de Hugo (suivant la direction  $-x$ ) a été considérée. Un second caractère variable peut être ajouté dans cette étude. En effet, cette première exploitation de la MM-DG-FDTD peut être traitée aussi en considérant trois orientations différentes de Hugo dans l'espace comme l'illustre la figure 4.5 :

- orientation suivant  $-y$ ,
- orientation suivant  $+x$ ,
- orientation suivant  $+y$ .

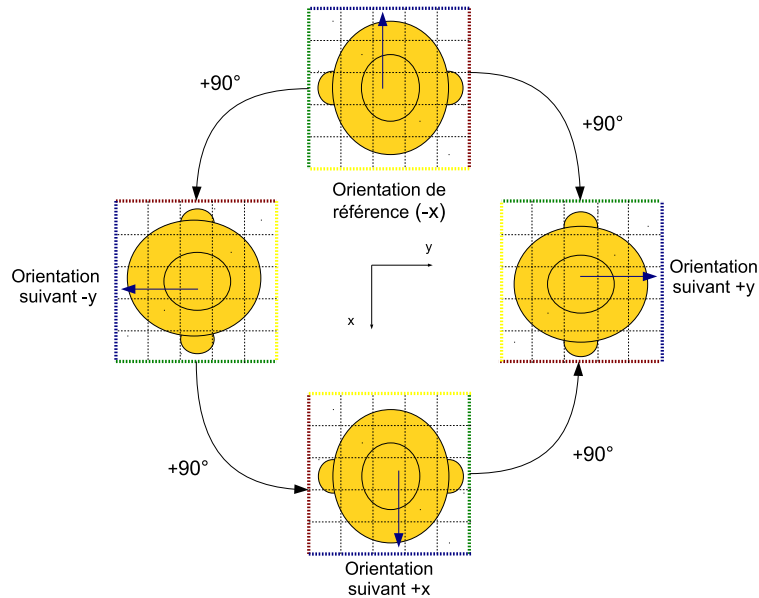


FIGURE 4.5 – Orientation de Hugo dans l'espace.

Afin de traiter efficacement ce caractère variable sans passer par une pré-étape nécessitant la simulation fine de Hugo pour chacune de ces trois orientations, il suffit de permuter les fonctions de transfert lors du changement d'orientation. Par exemple, la paroi du haut dans l'orientation de référence (couleur bleu) devient la paroi de gauche lors d'une orientation suivant -y (figure 4.5). La construction des modèles pour chaque orientation nécessite donc seulement de manipuler les fonctions de transfert de manière adéquate.

### Substitution de plusieurs étapes FDTD

Une extension de la MM-DG-FDTD à envisager vise à construire le modèle afin qu'il puisse substituer plusieurs étapes de la DG-FDTD. De façon à illustrer cette possibilité, le problème fortement multi-échelle présenté dans la figure 4.6 est considéré. L'objectif reste le même, fournir la valeur du champ électrique à l'intérieur de l'œil gauche dans un environnement potentiellement grand. La division DG-FDTD du problème est cette fois-ci effectuée en trois étapes :

- une première simulation FDTD grossière de l'ensemble de l'environnement,
- une seconde simulation décrit le modèle de corps humain avec une résolution intermédiaire,
- une dernière simulation fine de l'œil ainsi que de son espace proche (tête et haut du corps humain).

Une amélioration de la MM-DG-FDTD dans ce problème serait de construire le modèle de substitution pour qu'il remplace les deux dernières étapes. La pré-étape suivrait un procédé similaire à la DG-FDTD multiniveau utilisée pour sa capacité de dézoom (figure 4.7). Une première simulation FDTD fine décrivant l'œil et son espace proche serait excitée par un dipôle infinitésimal placé au point de calcul du champ (centre de l'œil). Une surface de prélèvement serait définie autour de la zone de l'œil et viendrait exciter une seconde simulation FDTD grâce à une surface d'excitation outside. Cette simulation utiliserait une résolution intermédiaire afin de représenter le modèle de corps humain et une surface de prélèvement  $S$  serait définie. Les champs récoltés sur cette dernière surface permettrait le calcul des fonctions de transfert indispensable à la construction du modèle de substitution. Une fois le modèle construit, l'étude d'une nouvelle position nécessiterait uniquement le lancement de la simula-

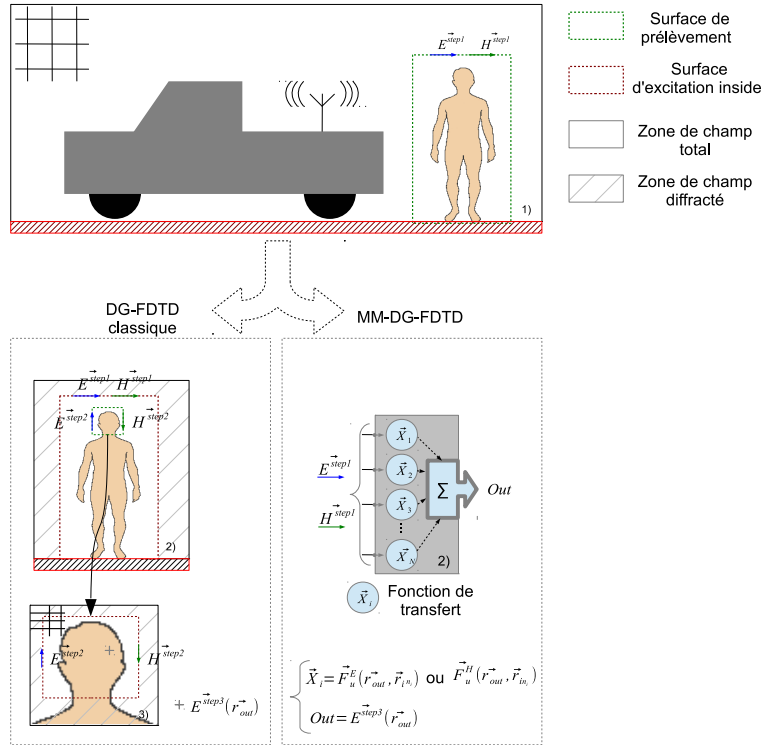


FIGURE 4.6 – Présentation du problème fortement multi-échelle en trois étapes.

tion grossière. La valeur du champ en sortie serait fournie grâce aux champs contenus sur la surface de prélèvement et du modèle de substitution.

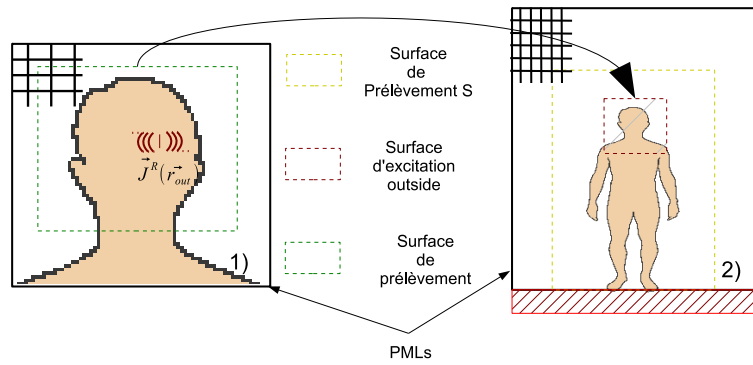


FIGURE 4.7 – Pré-étape de la MM-DG-FDTD : remplacement de deux étapes.

#### 4.2.6 Conclusion partielle sur la 1<sup>re</sup> exploitation

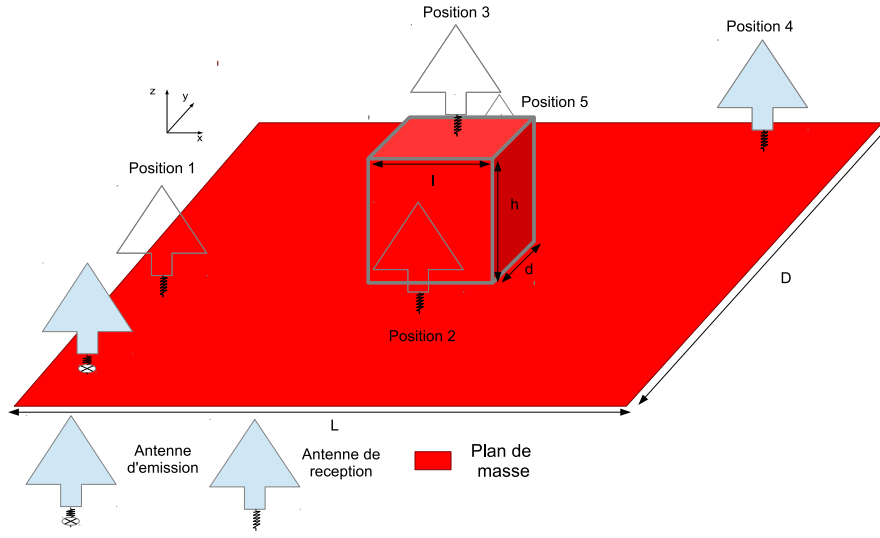
Pour conclure, cette première exploitation a présenté la résolution d'un scénario multi-échelle et variable dans un contexte de dosimétrie. L'estimation du champ électrique dans l'oeil gauche de Hugo pour plusieurs positions dans un grand environnement nécessite l'emploi d'un outil spécifique. Ce scénario ne peut être traité avec une DG-FDTD classique sans un énorme investissement en temps de calcul. Dans ces conditions, la méthode MM-DG-FDTD permet de traiter un tel cas de figure de manière rigoureuse et dans un délai acceptable. Son utilisation a permis une résolution beaucoup plus rapide que la DG-FDTD classique tout en conservant une bonne précision. Cette première application s'est conclue sur une discussion autour des possibilités d'exploitation de la MM-DG-FDTD.

### 4.3 Application dans un problème d'antenne : calcul du coefficient de transmission entre antennes ULB dans un grand environnement complexe et variable

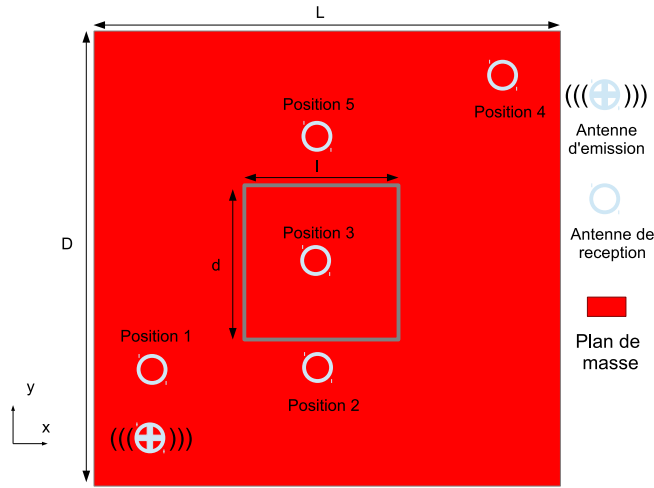
Cette seconde application s'inscrit dans la continuité du problème résolu dans le paragraphe 3.5.2 du chapitre 3. L'intérêt de cette exploitation est de montrer que la MM-DG-FDTD peut s'appliquer aussi dans ce genre de contexte présentant les deux aspects abordés dans cette thèse. Deux configurations d'étude sont étudiées.

#### 4.3.1 Présentation du problème

Le premier environnement est illustré dans la figure 4.8. Il met en situation une transmission entre antennes ULB (identique à l'antenne présentée dans le paragraphe 3.5.2) et propose d'estimer la valeur du paramètre  $S_{21}$  pour cinq positions de l'antenne de réception dans un grand environnement. Ce dernier présente un plan de masse infini au centre duquel est placée une structure parfaitement conductrice cubique. L'antenne d'émission est immobile et placée dans la cellule d'indice ( $i = 30; j = 20; k = 1$ ) tandis que la position de l'antenne de réception évolue au sein de l'environnement. Le tableau 4.2 donne les indices des cellules pour les cinq positions de l'antenne. La résolution de ce problème



(a) Vue de côté



(b) Vue de dessus

FIGURE 4.8 – Illustration du scénario d'antenne ULB dans un grand environnement complexe et variable.

est effectuée dans la bande de fréquence de  $[0-14]$  GHz avec un pas de 100 MHz. La scène possède les dimensions suivantes :

- $h = 1,0654 \times \lambda_{14\text{GHz}} = 22,8$  mm,
- $d = l = 1,1215 \times \lambda_{14\text{GHz}} = 24$  mm,
- $D = L = 5,6 \times \lambda_{14\text{GHz}} = 120$  mm,

avec  $\lambda_{14\text{GHz}} = 21,4$  mm. La base et la structure cubique sont modélisées par des PEC. L'objectif de cette étude est de comparer les performances de la

Position de l'antenne de réception	Indices de la cellule ( $i; j, k$ )
Position 1	(30; 40; 1)
Position 2	(60; 50; 1)
Position 3	(60; 60; 20)
Position 4	(90; 100; 1)
Position 5	(60; 80; 1)

TABLE 4.2 – Indices des cellules donnant les emplacements des antennes de réception pour l'étude d'une antenne ULB dans un grand environnement complexe et variable.

MM-DG-FDTD face à une utilisation classique de la DG-FDTD. Pour cela, deux études sont faites ; la première consacrée à l'estimation du coefficient de transmission pour les cinq positions et la seconde au temps de calcul pour  $W$  positions.

#### 4.3.2 Configuration de simulation

Les mêmes simulations que celles détaillées dans la section 3.5.2 du chapitre 3 sont utilisées pour résoudre ce cas avec la DG-FDTD et la MM-DG-FDTD. De manière similaire, la pré-étape se consacre à la construction du modèle de substitution. Puis, une première étape FDTD simule finement l'antenne en émission. Elle est suivie d'une seconde étape FDTD représentant les antennes en émission et en réception décrites grossièrement au sein de leur environnement. Pour finir, la dernière étape exploite le modèle de substitution fournissant ainsi les valeurs des champs nécessaires à la détermination du paramètre  $S_{21}$ . Pour l'étude d'une nouvelle position de l'antenne d'émission dans l'environnement, les étapes 2 et 3 doivent être reconduites. Le tableau 4.3 donne les différents paramètres de simulation pour chacune de ces étapes.

	DG-FDTD			
	MM-DG-FDTD			
	Pré-étape	1 <sup>re</sup> étape	2 <sup>e</sup> étape	
Pas spatiaux $dx = dy = dz$	0,3 mm	0,3 mm	1,2 mm	0,3 mm
Pas temporel $dt$	0,18283 ps	0,18283 ps	0,73132 ps	0,18283 ps
Observation $T_{\text{obs}}$	1 ns	1 ns	4 ns	4 ns
Volume FDTD $N_x \times N_y \times N_z$	$128 \times 60 \times 80$	$128 \times 60 \times 80$	$120 \times 120 \times 50$	$128 \times 60 \times 80$

TABLE 4.3 – Paramètres des configurations DG-FDTD et MM-DG-FDTD pour l'étude du problème d'antennes.

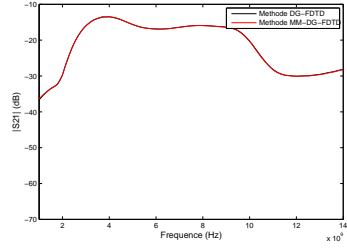
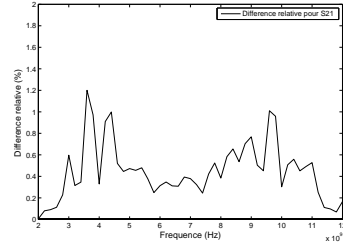
### 4.3.3 Résultats : estimation du paramètre $S_{21}$

La figure 4.9 confronte les valeurs du paramètre  $S_{21}$  obtenues avec les deux méthodes. Ces paramètres ainsi que les différences relatives (équation 3.15) sont estimés pour les cinq positions sélectionnées. Les résultats obtenus montrent une très bonne concordance entre les méthodes DG-FDTD et MM-DG-FDTD. La différence relative pour les cinq positions est toujours inférieure à 1,2% sur toute la bande de fréquence.

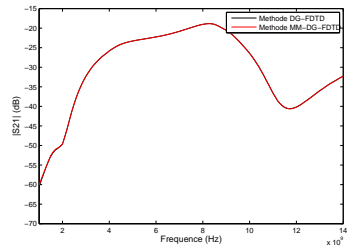
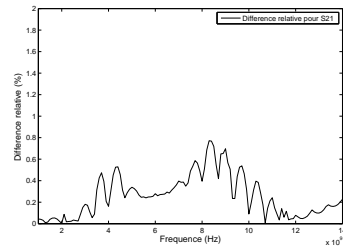
La figure 4.12 compare les évolutions du paramètre  $S_{21}$  calculées grâce à la MM-DG-FDTD pour les cinq positions. La position 1 étant la plus proche de l'antenne d'émission, elle possède les valeurs de  $S_{21}$  les plus élevées. Les résultats obtenus pour les autres positions sont plus faibles à mesure que la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente.

### 4.3.4 Résultats : temps de calcul

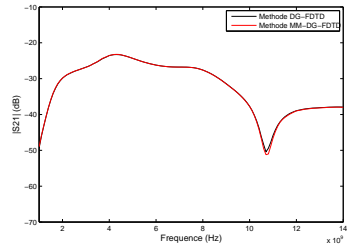
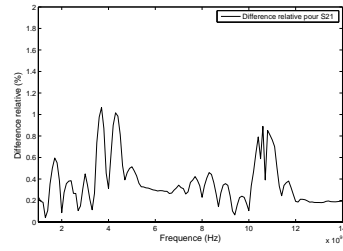
La bande de fréquence d'étude et le pas sélectionné imposent un nombre de points de fréquence de 131. La construction du modèle de substitution est exécutée comme dans le paragraphe 3.5.2, elle exige donc le même temps de calcul qui est de 555,51 min. Le tableau 4.4 expose la comparaison des temps de calcul entre une utilisation de la DG-FDTD et de la MM-DG-FDTD pour  $W$  positions. La 1<sup>re</sup> et la 2<sup>e</sup> étape sont communes aux deux méthodes, elles présentent des temps de simulation respectivement de 7,35 min et de 8,15 min. Enfin, grâce à la construction du modèle, la 3<sup>e</sup> étape de la MM-DG-FDTD

(a) Paramètre  $S_{21}$  - position 1

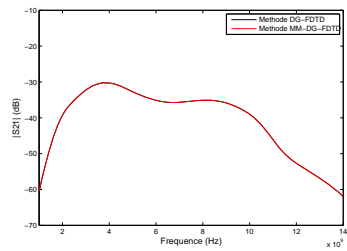
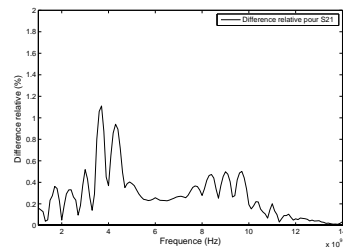
(b) Différence relative - position 1

(c) Paramètre  $S_{21}$  - position 2

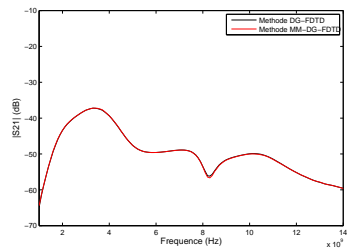
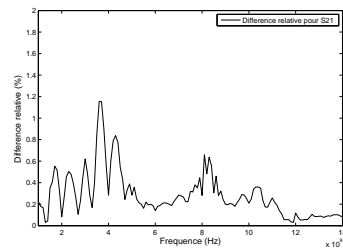
(d) Différence relative - position 2

(e) Paramètre  $S_{21}$  - position 3

(f) Différence relative - position 3

(g) Paramètre  $S_{21}$  - position 4

(h) Différence relative - position 4

(i) Paramètre  $S_{21}$  - position 5

(j) Différence relative - position 5

FIGURE 4.9 – Comparaison de l'évolution du coefficient de transmission pour différentes position pour la première configuration.



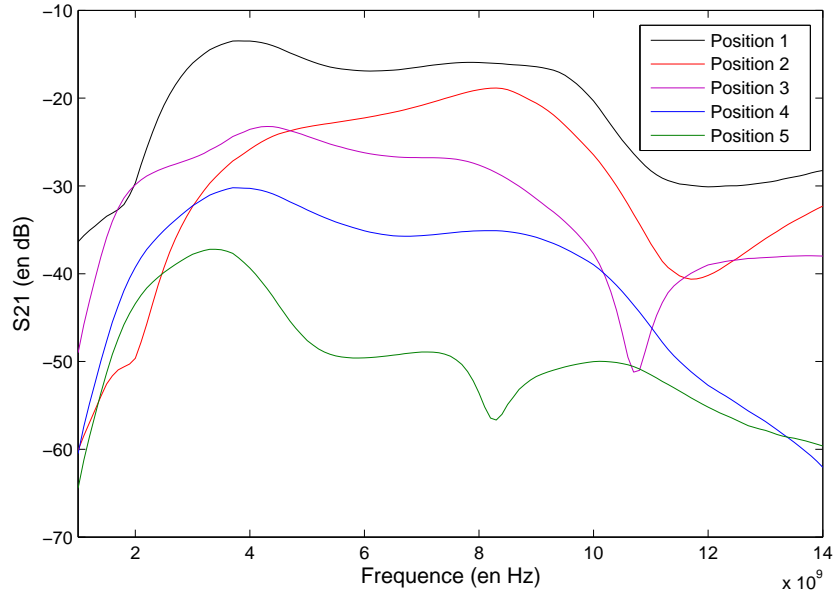


FIGURE 4.10 – Évolution du coefficient de transmission calculé par la MM-DG-FDTD pour la première configuration.

s'exécute en 19,65 min alors qu'elle se lance en 37,11 min pour la DG-FDTD. L'étude d'une nouvelle position requiert seulement le lancement des deux dernières étapes. Ainsi, l'emploi de la méthode DG-FDTD pour toute nouvelle position conduit à un temps de 45,26 min tandis que la MM-DG-FDTD nécessite 27,8 min.

	DG-FDTD	MM-DG-FDTD
Pré-étape	-	555,51 min
1 <sup>re</sup> étape	7,35 min	7,35 min
2 <sup>e</sup> étape	$8,15 \times W$ min	$8,15 \times W$ min
3 <sup>e</sup> étape	$37,11 \times W$ min	$0,15 \times 131 \times W$ min
Total	$7,35 + 45,26 \times W$ min	$562,86 + 27,8 \times W$ min

TABLE 4.4 – Temps de simulation du problème d'antennes pour  $W$  positions pour la première configuration.

La figure 4.11 montre que la méthode MM-DG-FDTD devient compétitive pour une étude portant sur plus de 31 positions. Comme énoncées dans les conclusions de l'étude du paragraphe 3.5.2, les conditions d'application de la méthode MM-DG-FDTD ne sont pas favorables. Le caractère ULB de l'étude et le pas fréquentiel choisi imposent un investissement conséquent principalement pour la construction du modèle de substitution. Afin de rendre la méthode MM-DG-FDTD plus intéressante à exploiter, il n'est pas utile de choisir un pas aussi petit pour une aussi grande bande d'étude. Pour illustrer cette conclusion, une seconde étude reprenant le même environnement est proposée. Des ajustements aux niveaux du nombre de point de fréquence sont appliqués.

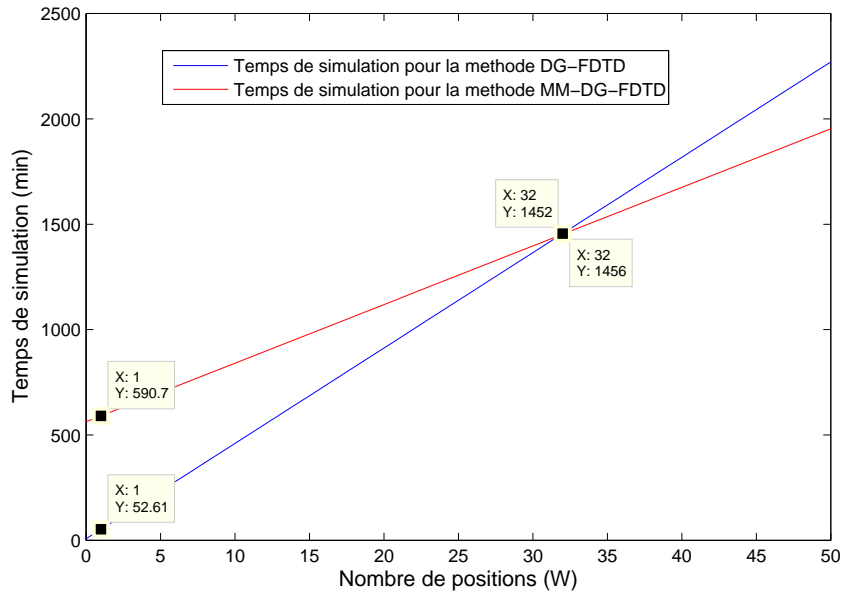


FIGURE 4.11 – Temps de simulation pour les deux méthodes - première configuration.

#### 4.3.5 Seconde étude : nouvelle configuration du problème

##### Présentation du problème

L'étude du même problème est effectuée cette fois-ci sur la bande [2-12] GHz avec un pas fréquentiel de 200 MHz. Dans cette nouvelle configuration, un

nombre de 51 points de fréquence est choisi. Les dimensions de l'environnement sont :

- $h = 0,912 \times \lambda_{12\text{GHz}} = 22,8 \text{ mm}$ ,
- $d = l = 0,96 \times \lambda_{12\text{GHz}} = 24 \text{ mm}$ ,
- $D = L = 4,8 \times \lambda_{12\text{GHz}} = 120 \text{ mm}$ ,

avec  $\lambda_{12\text{GHz}} = 25 \text{ mm}$ .

Les études effectuées pour l'environnement précédent sont reconduites.

### Résultats : estimation du paramètre $S_{21}$

Les évolutions du paramètre  $S_{21}$  calculées grâce à la MM-DG-FDTD pour les cinq positions sont présentées dans la figure 4.12. Les résultats obtenus avec la MM-DG-FDTD restent précis pour les cinq positions malgré la réduction du nombre de pas fréquentiel.

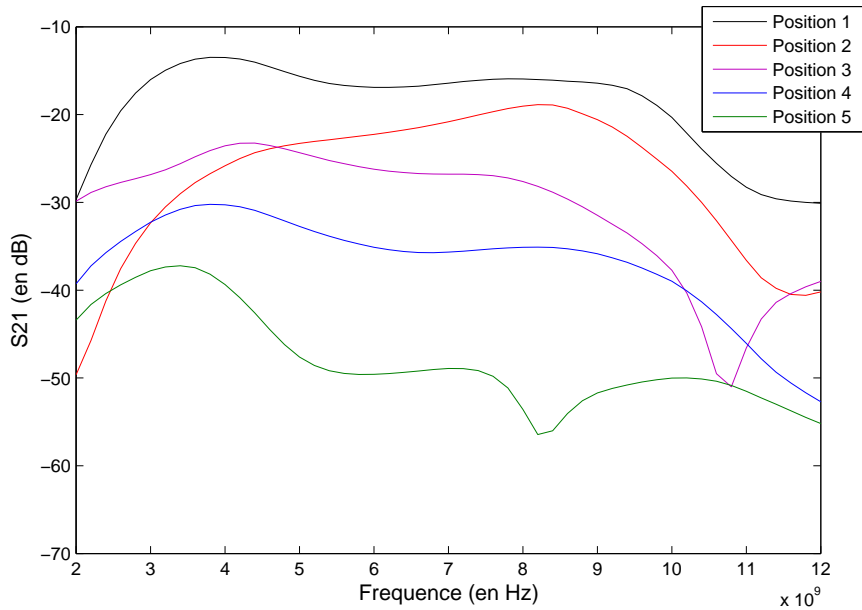


FIGURE 4.12 – Évolution du coefficient de transmission calculé par la MM-DG-FDTD pour la seconde configuration.

### Résultats : temps de calcul

Le tableau 4.5 présente les temps de simulation pour la construction du modèle

de substitution avec les nouvelles données de simulation, le nombre de points de fréquence étant maintenant de 51. Cette pré-étape est composée de cinq simulations FDTD avec un temps de calcul de 7,35 min chacune et du calcul des fonctions de transfert pour les 51 points. La construction du modèle de substitution nécessite désormais 238,71 min. L'étude d'une nouvelle position par la MM-DG-FDTD dans cette nouvelle configuration nécessite 15,8 min alors que la DG-FDTD conserve un temps de calcul de 45,26 min. Comme il est possible de le constater dans la figure 4.13, la MM-DG-FDTD devient rentable à partir de la 9<sup>e</sup> position alors que dans le cas précédent cette méthode était rentable à partir de la 32<sup>e</sup> position. Le tableau 4.6 présente les nouveaux temps de calcul pour cette étude.

	Pré-étape
Simulations FDTD	$7,35 \text{ min} \times 5$
Fonction de transfert	$3,96 \text{ min} \times 51$
total	238,71 min

TABLE 4.5 – Temps de construction du modèle de substitution pour la seconde configuration.

	DG-FDTD	MM-DG-FDTD
Pré-étape	-	238,71 min
1 <sup>re</sup> étape	7,35 min	7,35 min
2 <sup>e</sup> étape	$8,15 \times W \text{ min}$	$8,15 \times W \text{ min}$
3 <sup>e</sup> étape	$37,11 \times W \text{ min}$	$0,15 \times 51 \times W \text{ min}$
Total	$7,35 + 45,26 \times W \text{ min}$	$246,06 + 15,8 \times W \text{ min}$

TABLE 4.6 – Temps de simulation du problème d'antennes pour  $W$  positions pour la seconde configuration.

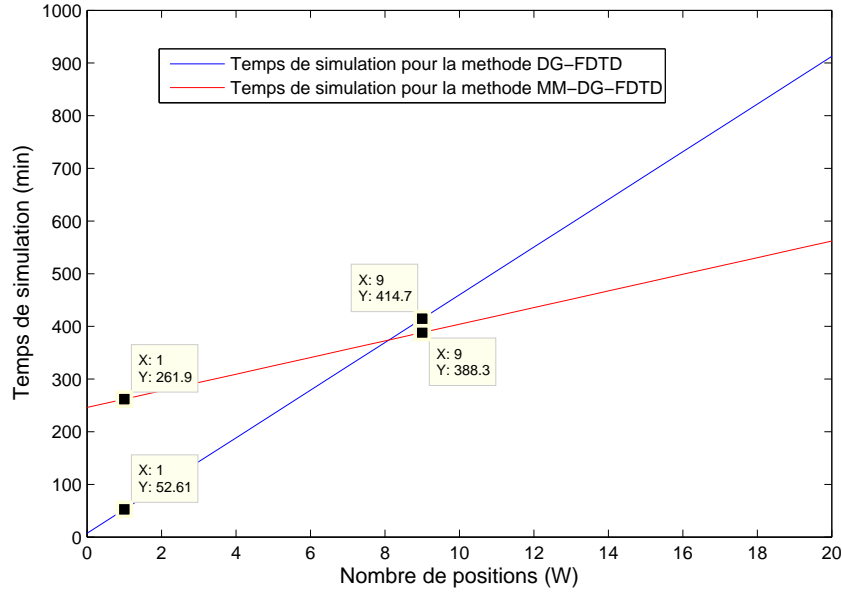


FIGURE 4.13 – Temps de simulation pour les deux méthodes - seconde configuration.

#### 4.3.6 Conclusion partielle sur la 2<sup>e</sup> exploitation

Pour conclure cette seconde exploitation, l'application de la méthode MM-DG-FDTD dans un contexte de transmission entre antennes est sujet à discussion. En effet, même si cette approche fournit des résultats précis et propose ainsi une exécution plus rapide de l'étape substituée, les temps de calcul de la MM-DG-FDTD n'offrent pas d'avantage conséquent vis-à-vis de la DG-FDTD. Les résultats ont montré que les performances de la MM-DG-FDTD dépendent du nombre de points de fréquence dans l'étude. En effet, les temps de calcul, principalement dus à la construction du modèle de substitution, varient selon le nombre de points de fréquence et peuvent potentiellement devenir considérables comme le montre la première configuration d'étude. Il faut opter pour un pas fréquentiel suffisamment précis pour représenter correctement l'évolution du coefficient de transmission dans toute la bande d'étude tout en permettant d'obtenir ces résultats dans les meilleurs délais. Un compromis est donc nécessaire.

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la nouvelle approche MM-DG-FDTD a été appliquée dans deux scénarios différents. La combinaison de la DG-FDTD avec un modèle de substitution permet ainsi de traiter efficacement des problèmes électromagnétiques variables et multi-échelles.

Cette méthode a tout d'abord été appliquée dans un scénario de dosimétrie. La valeur du champ électrique dans l'œil gauche à la fréquence de 60 MHz a été estimée efficacement pour 888 positions d'un modèle de corps humain autour du véhicule surmonté d'une antenne.

Ensuite, la MM-DG-FDTD a été appliquée dans un contexte ayant pour thème la transmission entre antennes ULB. La valeur du coefficient  $S_{21}$  a été estimée pour 5 positions différentes de l'antenne en réception dans un environnement grand et complexe. Deux études ont été menées pour une bande d'étude de [0-14] GHz et une bande de [2-12] GHz. Les résultats simulés ont été comparés avec ceux de la DG-FDTD classique et un très bon accord entre les deux méthodes a été montré.

Ces deux exemples montrent que cette nouvelle méthode est efficace et simple à mettre en œuvre. Après une phase dédiée à la construction du modèle de substitution, cette nouvelle approche possède un processus d'exécution pratiquement identique à la DG-FDTD. L'étude mettant l'accent sur les temps de simulation et effectuée pour les deux scénarios montre que cette construction nécessite un investissement en temps parfois conséquent. Ce coût en temps doit être amorti par une étude sur plusieurs positions. C'est pourquoi, l'utilisation d'une telle méthode ne montre de l'intérêt que pour une étude intégrant une partie variable, et, dans une certaine mesure, si le point de mesure n'est pas changé ou/et si plus de points de mesure ne sont pas requis.

# Conclusion générale et perspectives

## Conclusion

Une nouvelle méthode dédiée à la résolution d'études électromagnétiques a été développée au cours de cette thèse. L'intérêt principal est de fournir une estimation du champ électromagnétique par simulation numérique dans un problème variable et multi-échelle. Basée sur l'utilisation d'un modèle de substitution, cette approche propose de reprendre le schéma de résolution de la DG-FDTD. Cette association appliquée dans deux contextes différents, fournit des résultats rapides tout en conservant une bonne précision.

Le premier chapitre a tout d'abord permis de définir la problématique abordée durant cette thèse. Le but principal est de fournir une estimation numérique rapide et précise du champ électromagnétique en un nombre limité de points de l'espace. Les études sont menées pour plusieurs positions de l'objet d'étude dans un environnement présentant un contraste d'échelle. Il est ainsi nécessaire de caractériser de manière optimale le canal de propagation afin de tenir compte de toutes les interactions entre l'objet d'étude et la source rayonnante. Afin d'illustrer cette problématique, deux contextes d'étude accompagnés de deux scénarios ont été sélectionnés. Une première étude propose de traiter un problème de dosimétrie électromagnétique. La seconde s'intéresse à une transmission entre deux antennes complexes. Une fois ces scénarios détaillés, un état de l'art des méthodes pouvant potentiellement résoudre ces aspects de la thèse a été présenté. La comparaison de plusieurs techniques de simulation numérique a permis de mettre en avant les avantages des approches FDTD pour résoudre l'aspect multi-échelle de la problématique tandis que le

problème variable est traité grâce à l'utilisation d'un modèle de substitution.

La FDTD sous sa forme basique a ensuite été présentée dans le deuxième chapitre. Le principe général ainsi qu'un exemple d'application ont mis l'accent sur les principales limitations de la FDTD classique qui ont conduit au développement de différentes méthodes avancées : la DG-FDTD bilatérale et la DG-FDTD multiniveau. Ces extensions, exposées dans ce même chapitre, proposent de diviser l'ensemble du problème en plusieurs volumes FDTD possédant leur propre niveau de résolution. Ce choix permet d'adapter le maillage suivant la zone de l'environnement décrite. Une exploitation de la DG-FDTD sur un problème fortement multi-échelle a été proposée dans une dernière partie. L'étude a consisté à évaluer la valeur du champ électrique dans l'œil gauche d'un modèle de corps humain à proximité d'un véhicule surmonté d'une antenne. Les résultats ont montré que malgré la précision apportée par la méthode DG-FDTD, cette dernière présente une difficulté en terme de temps de calcul principalement causée par l'étape simulant de manière fine l'objet d'étude. Ainsi, résoudre un problème variable en utilisant seulement la DG-FDTD dans le cas de figure proposé nécessite un énorme investissement en temps. Cette étude a notamment permis de motiver la nouvelle approche FDTD, développée durant cette thèse.

Le troisième chapitre est consacré à la méthode la MM-DG-FDTD. Cette nouvelle approche propose la combinaison de la DG-FDTD avec un modèle de substitution dans le but de traiter efficacement un problème variable et multi-échelle. Cette méthode reprend les mêmes étapes que la DG-FDTD et remplace l'étape coûteuse en temps par un modèle rapide. Ce modèle, construit en peu de simulations numériques, fonctionne grâce à l'exploitation de fonctions de transfert dans le domaine fréquentiel. Il a d'abord été validé dans deux cas canoniques : le premier propose d'évaluer la valeur du champ électrique à l'intérieur d'un matériau diélectrique et le second traite d'une transmission entre deux antennes filaires. Ensuite, la MM-DG-FDTD a été validée dans les deux contextes abordés durant cette thèse. La première exploitation reprend l'étude traitée par la DG-FDTD dans le chapitre 2. La seconde exploitation propose d'évaluer le coefficient de transmission entre deux antennes ULB dans la bande de fréquence [0-14] GHz. Les conclusions des différentes études ont montré que la MM-DG-FDTD fournit des résultats rapides et devient intéressante à exploiter sous certaines conditions. En effet, le modèle de substitution nécessite



un temps de construction dépendant des données d'étude. Ce temps investi ne peut être rentabilisé que sur une étude portée sur un nombre suffisant de positions de l'objet d'étude.

Le dernier chapitre expose l'exploitation de la MM-DG-FDTD sur les deux scénarios sélectionnés dans le chapitre 1. Le premier scénario traite du problème fortement multi-échelle dans le contexte de dosimétrie traité dans les chapitres précédents. La valeur du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain est évaluée pour un grand nombre de positions. Les résultats montrent que la MM-DG-FDTD offre rapidement un gain significatif en temps de calcul. Le second scénario propose d'évaluer le coefficient de transmission entre deux antennes ULB dans un environnement complexe. Plusieurs positions de l'antenne en réception ont été considérées et la valeur du paramètre  $S_{21}$  a été évaluée pour chacune d'elles. Une étude centrée sur les temps de calcul a mis en évidence que le gain apporté par cette nouvelle approche vis-à-vis de la DG-FDTD est obtenue sous certaines conditions.

## Perspectives

Les problématiques abordées durant cette thèse, à savoir l'aspect fortement multi-échelle et l'aspect variable, sont présents dans de nombreuses applications. Ainsi, la nouvelle approche MM-DG-FDTD utilisée et développée dans cette thèse constitue une solution performante pour traiter ces problèmes. L'efficacité de cette nouvelle méthode dépend principalement des dimensions du modèle de substitution : nombre de composantes de champs à évaluer et nombre de points de fréquence. Les perspectives abordées se concentrent en partie sur des pistes à développer afin de rendre le modèle construit plus performant rendant la MM-DG-FDTD plus compétitive.

### Construction du modèle de substitution pour plusieurs points en sortie en une simulation électromagnétique

Une première perspective à explorer consisterait à améliorer la construction du modèle en évitant la multiplication des simulations FDTD dans la pré-étape. La partie 3.3 du chapitre 3 a montré que l'évaluation d'une composante de champ nécessite une simulation FDTD pour construire le modèle. Pour rappel, afin d'évaluer la composante  $E_x$  en sortie du modèle, il faut lancer une simulation FDTD excitée par une source  $J_x$  dans la pré-étape tandis

que l'évaluation de la composante  $E_y$  nécessite de lancer une autre simulation FDTD excitée par une source  $J_y$ . De plus, le modèle se limite à l'évaluation du champ en un point de l'espace. L'étude de la partie 2.2.4.1 du chapitre 2 a montré que le calcul du DAS oeil gauche nécessite les valeurs des composantes électriques estimées dans toutes les cellules de l'oeil. Un grand nombre de simulations FDTD dans la pré-étape est donc nécessaire pour calculer la valeur du DAS dans une problématique variable.

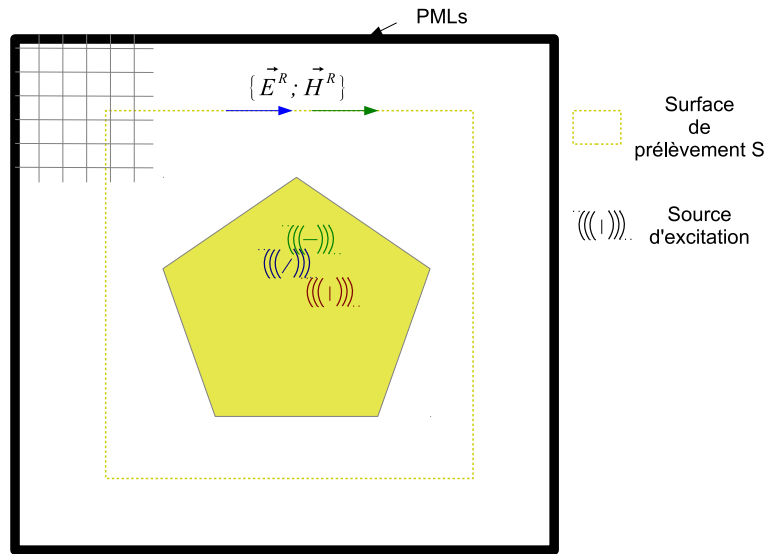


FIGURE 4.14 – Pré-étape de la MM-DG-FDTD : excitation avec différentes sources dans le volume FDTD.

Une proposition d'amélioration de la méthode MM-DG-FDTD serait de rendre la construction du modèle de substitution possible en une seule et unique simulation FDTD même pour la détermination de plusieurs composantes de champ. Pour cela, cette simulation FDTD serait excitée par plusieurs sources suivant différentes directions et/ou points de l'espace comme l'illustre la figure 4.14. La difficulté majeure de cette solution consisterait à identifier quelles informations récoltées sur la surface  $S$  sont associées à chacune des sources. Pour cela, une modulation des excitations serait nécessaire. Une piste d'exploration consisterait à exciter les sources avec des signaux orthogonaux en fréquence pour séparer les signaux associées aux différentes sources.

### Hybridation de la méthode DG-FDTD/IPO avec un modèle de substitution pour la modélisation de canal dans un très grand environnement

Une nouvelle méthode nommée DG-FDTD/IPO<sup>1</sup> a été développée pour l'étude d'antenne environnée et positionnée sur des plate-formes de grandes dimensions électriques [84]. Une dernière perspective à envisager viserait à associer la DG-FDTD/IPO et le modèle de substitution dans l'intention de permettre l'étude de transmission entre antennes sur porteur.

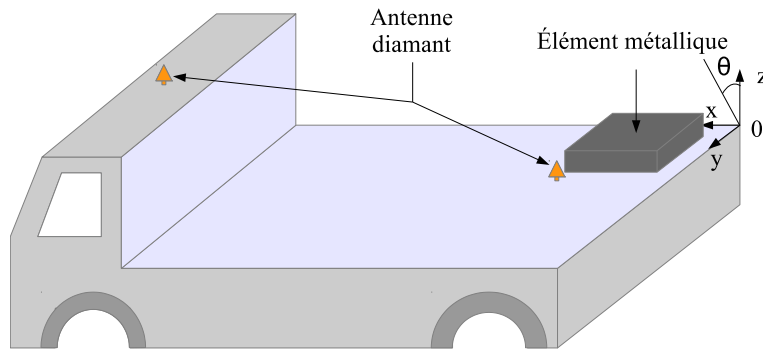


FIGURE 4.15 – Présentation du scénario antenne sur porteur.

Pour illustrer cette perspective, une étude comportant une antenne sur un porteur de type véhicule est considérée (figure 4.15). Deux antennes diamants dont l'une placée à proximité d'une structure métallique sont localisées sur un pick-up. Une utilisation classique de la DG-FDTD/IPO est divisée en deux parties :

- la partie DG-FDTD simulant l'antenne et son environnement proche de manière précise,
- la partie IPO qui s'occupe de modéliser grossièrement l'ensemble de l'environnement.

Une hybridation de cette méthode avec le modèle de substitution consisterait à insérer ce modèle en troisième partie afin de remplacer une étape décrivant un objet d'étude de manière fine (antenne ou zone précise de l'espace). Cette nouvelle approche est représentée sur la figure 4.16. Profitant du fonctionnement

---

1. Iterative Physical Optics

de l'IPO dans le domaine fréquentiel, une surface de prélèvement de champs serait définie dans le but de fournir les entrées du modèle. Cette association serait particulièrement intéressante à exploiter dans une étude d'adaptation de couplage entre antennes sur porteur.

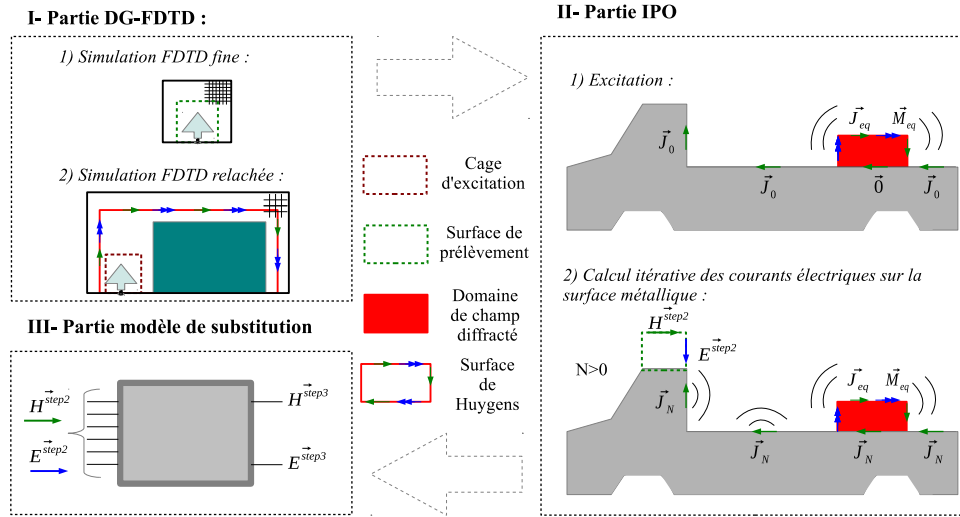


FIGURE 4.16 – Application de l'hybridation de la DG-FDTD/IPO et du modèle de substitution sur le scénario antenne sur porteur.

## Annexe A

# Equation de mise à jour de la FDTD

La résolution des équations de Maxwell dans le domaine temporel constitue le principe de base de la FDTD proposé par Yee en 1966 [21]. Les six composantes du champ peuvent être placées suivant un formalisme donné par la cellule Yee de dimension  $dx \times dy \times dz$ . Les composantes de champ électrique et magnétique sont décalées dans l'espace d'une demi-cellule les unes par rapport aux autres. Ainsi, par convention, les composantes de champ électrique sont évaluées au centre des arêtes des cellules et les composantes de champ magnétique sont déterminées au centre des faces de ces mêmes cellules. Un volume de calcul FDTD est ainsi décomposé en cellules élémentaires parallélépipédiques (figure 2.1).

les équations de mise à jour de la FDTD sont :

– pour les composantes de champ électrique :

$$\begin{aligned} E_x|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} &= \frac{1 - \frac{\sigma dt}{2\epsilon}}{1 + \frac{\sigma dt}{2\epsilon}} E_x|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \\ &+ \frac{dt}{\epsilon(1 + \frac{\sigma dt}{2\epsilon})} \left( \frac{H_z|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{dy} - \frac{H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{dz} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{aligned}
Ey|_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} &= \frac{1 - \frac{\sigma dt}{2\epsilon}}{1 + \frac{\sigma dt}{2\epsilon}} Ey|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \\
&+ \frac{dt}{\epsilon(1 + \frac{\sigma dt}{2\epsilon})} \left( \frac{H_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{dz} - \frac{H_z|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z|_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{dx} \right)
\end{aligned} \tag{A.2}$$

$$\begin{aligned}
Ez|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} &= \frac{1 - \frac{\sigma dt}{2\epsilon}}{1 + \frac{\sigma dt}{2\epsilon}} Ez|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \\
&+ \frac{dt}{\epsilon(1 + \frac{\sigma dt}{2\epsilon})} \left( \frac{H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{dx} - \frac{H_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{dy} \right)
\end{aligned} \tag{A.3}$$

– pour les composantes de champ magnétique :

$$\begin{aligned}
H_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} &= H_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} \\
&+ \frac{dt}{\mu_0} \left( \frac{E_y|_{i,j+\frac{1}{2},k+1}^n - E_y|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n}{dz} - \frac{E_z|_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}^n - E_z|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}{dy} \right)
\end{aligned} \tag{A.4}$$

$$\begin{aligned}
H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} &= H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} \\
&+ \frac{dt}{\mu_0} \left( \frac{E_z|_{i+1,j,k+\frac{1}{2}}^n - E_z|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}{dx} - \frac{E_x|_{i+\frac{1}{2},j,k+1}^n - E_x|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{dz} \right)
\end{aligned} \tag{A.5}$$

$$\begin{aligned}
H_z|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} &= H_z|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n-\frac{1}{2}} \\
&+ \frac{dt}{\mu_0} \left( \frac{E_x|_{i+\frac{1}{2},j+1,k}^n - E_x|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{dy} - \frac{E_y|_{i+1,j+\frac{1}{2},k}^n - E_y|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n}{dx} \right)
\end{aligned} \tag{A.6}$$

où,  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  ( $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} F/m$ ) est la permittivité électrique du milieu,  $\mu = \mu_r \mu_0$  ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ ) la perméabilité magnétique du milieu,  $\sigma$  la conductivité électrique du milieu et  $dt$  le pas temporel

## Annexe B

# Calcul des fonctions de transfert pour les surfaces de la cage d'excitation

Cette annexe détaille le calcul des fonctions de transfert nécessaire à la construction du modèle de substitution présenté dans le chapitre 3. La figure B.1 correspond à une représentation 3D de cette pré-étape de la MM-DG-FDTD. Une surface de prélèvement  $S$  est définie dans un maillage de résolution  $dx \times dy \times dz$ . Les indices des cellules localisées aux extrémités de cette surface sont  $(i_{inf}, j_{inf}, k_{inf})$  et  $(i_{su}, j_{su}, k_{su})$ . Le calcul des fonctions de transfert est effectué face par face dans une cellule de volume élémentaire  $\Delta V = dx.dy.dz$ . Les composantes de champ électrique et magnétique  $\{\vec{E}^R; \vec{H}^R\}$  récoltées au niveau des surfaces correspondent aux composantes tangentielles.

**Face inférieure de normale  $\vec{n} = \vec{e}_x$** , soit en  $x = i_{inf}dx$  :

- $\Delta S = dy.dz$  et  $\frac{\Delta S}{\Delta V} = \frac{1}{dx}$ ,
- les composantes électriques tangentielles sont  $\vec{E}^R = \{E_y^R; E_z^R\}$ ,
- les composantes magnétiques tangentielles sont  $\vec{H}^R = \{H_y^R; H_z^R\}$ .

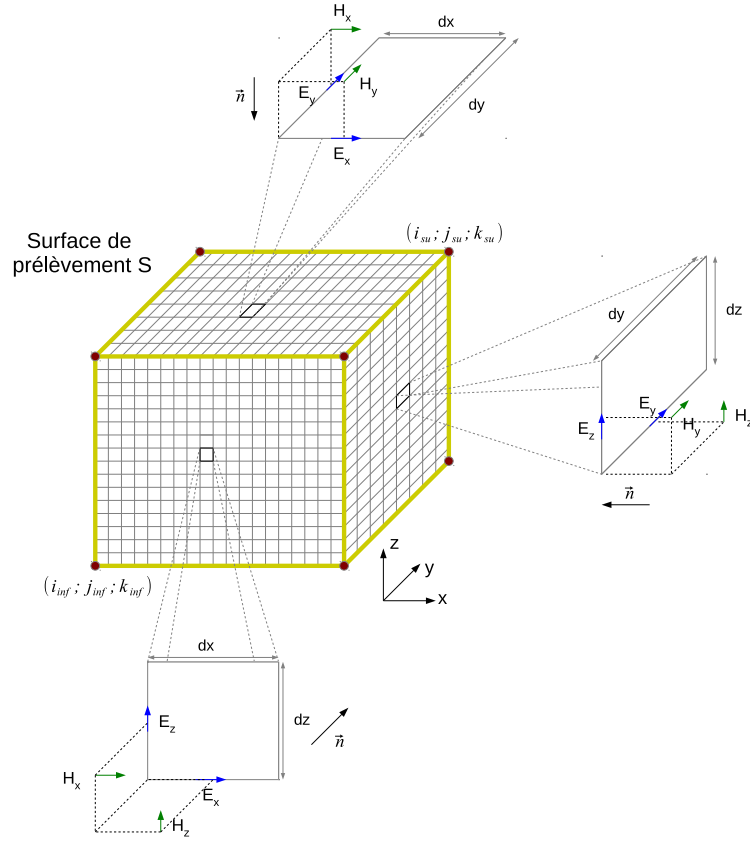


FIGURE B.1 – Représentation 3D d'une surface de prélèvement S.

$$F_u^{E_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dx} \frac{H_z(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{E_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dx} \frac{H_y(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.1)$$

$$F_u^{H_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dx} \frac{E_z(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{H_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dx} \frac{E_y(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.2)$$

$$G_u^{E_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dx} \frac{H_z(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{E_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dx} \frac{H_y(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.3)$$

$$G_u^{H_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dx} \frac{E_z(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{H_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dx} \frac{E_y(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.4)$$

**Face inférieure de normale  $\vec{n} = \vec{e}_y$**  , soit en  $y = j_{inf} dy$  :

- $\Delta S = dx.dz$  et  $\frac{\Delta S}{\Delta V} = \frac{1}{dy}$ ,
- les composantes électriques tangentielles sont  $\vec{E}^R = \{E_x^R; E_z^R\}$ ,
- les composantes magnétiques tangentielles sont  $\vec{H}^R = \{H_x^R; H_z^R\}$ .



$$F_u^{E_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dy} \frac{H_z(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{E_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dy} \frac{H_x(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.5)$$

$$F_u^{H_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dy} \frac{E_z(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{H_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dy} \frac{E_x(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.6)$$

$$G_u^{E_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dy} \frac{H_z(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{E_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dy} \frac{H_x(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.7)$$

$$G_u^{H_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dy} \frac{E_z(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{H_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dy} \frac{E_x(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.8)$$

**Face inférieure de normale  $\vec{n} = \vec{e}_z$**  , soit en  $z = k_{inf} dz$  :

- $\Delta S = dx \cdot dy$  et  $\frac{\Delta S}{\Delta V} = \frac{1}{dz}$ ,
- les composantes électriques tangentielles sont  $\vec{E}^R = \{E_x^R, E_y^R\}$ ,
- les composantes magnétiques tangentielles sont  $\vec{H}^R = \{H_x^R, H_z^R\}$ .

$$F_u^{E_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dz} \frac{H_y(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{E_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dz} \frac{H_x(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.9)$$

$$F_u^{H_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dz} \frac{E_y(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{H_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dz} \frac{E_x(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.10)$$

$$G_u^{E_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dz} \frac{H_y(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{E_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dz} \frac{H_x(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.11)$$

$$G_u^{H_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dz} \frac{E_y(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{H_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dz} \frac{E_x(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.12)$$

**Face supérieure de normale  $\vec{n} = -\vec{e}_x$**  , soit en  $x = i_{su} dx$  :

- $\Delta S = dy \cdot dz$  et  $\frac{\Delta S}{\Delta V} = \frac{1}{dx}$ ,
- les composantes électriques tangentielles sont  $\vec{E}^R = \{E_y^R, E_z^R\}$ ,
- les composantes magnétiques tangentielles sont  $\vec{H}^R = \{H_y^R, H_z^R\}$ .

$$F_u^{E_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dx} \frac{H_z(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{E_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dx} \frac{H_y(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.13)$$

$$F_u^{H_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dx} \frac{E_z(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{H_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dx} \frac{E_y(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.14)$$

$$G_u^{E_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dx} \frac{H_z(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{E_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dx} \frac{H_y(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.15)$$

$$G_u^{H_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dx} \frac{E_z(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{H_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dx} \frac{E_y(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (B.16)$$

**Face supérieure de normale  $\vec{n} = -\vec{e}_y$**  , soit en  $y = j_{su} dy$  :

- $\Delta S = dx \cdot dz$  et  $\frac{\Delta S}{\Delta V} = \frac{1}{dy}$ ,
- les composantes électriques tangentielles sont  $\vec{E}^R = \{E_x^R, E_z^R\}$ ,

- les composantes magnétiques tangentielles sont  $\vec{H}^R = \{H_x^R, H_z^R\}$ .

$$F_u^{E_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dy} \frac{H_z(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{E_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dy} \frac{H_x(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (\text{B.17})$$

$$F_u^{H_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dy} \frac{E_z(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{H_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dy} \frac{E_x(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (\text{B.18})$$

$$G_u^{E_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dy} \frac{H_z(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{E_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dy} \frac{H_x(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (\text{B.19})$$

$$G_u^{H_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dy} \frac{E_z(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{H_z}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dy} \frac{E_x(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (\text{B.20})$$

**Face supérieure de normale  $\vec{n} = -\vec{e}_z$  , soit en  $z = k_{su}dz$  :**

- $\Delta S = dx.dy$  et  $\frac{\Delta S}{\Delta V} = \frac{1}{dz}$ ,
- les composantes électriques tangentielles sont  $\vec{E}^R = \{E_x^R, E_y^R\}$ ,
- les composantes magnétiques tangentielles sont  $\vec{H}^R = \{H_x^R, H_z^R\}$ .

$$F_u^{E_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dz} \frac{H_y(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{E_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dz} \frac{H_x(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (\text{B.21})$$

$$F_u^{H_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dz} \frac{E_y(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad F_u^{H_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dz} \frac{E_x(\vec{r}_{in})}{J_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (\text{B.22})$$

$$G_u^{E_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dz} \frac{H_y(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{E_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dz} \frac{H_x(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (\text{B.23})$$

$$G_u^{H_x}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = -\frac{1}{dz} \frac{E_y(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad G_u^{H_y}(\vec{r}_{out}, \vec{r}_{in}) = \frac{1}{dz} \frac{E_x(\vec{r}_{in})}{M_u^R(\vec{r}_{out})} \quad (\text{B.24})$$

## Annexe C

# Paramètres électriques de “Hugo” dans la bande [0-100] MHz

Fréquence (MHz)	oeil	corps
1	2178,298	1046,701
10	208,251	116,798
20	124,102	73,467
30	99,531	59,415
40	87,909	52,465
50	81,131	48,314
60	76,681	45,550
70	73,803	43,572
80	71,176	42,086
90	69,349	40,925
100	67,887	39,994

TABLE C.1 – Permittivité relative  $\epsilon_r$  du modèle de corps humain Hugo homogène.

Fréquence (MHz)	oeil ( $S/m$ )	corps ( $S/m$ )
1	0,726	0,307
10	0,797	0,340
20	0,845	0,366
30	0,868	0,381
40	0,878	0,390
50	0,884	0,394
60	0,887	0,397
70	0,889	0,399
80	0,891	0,400
90	0,892	0,401
100	0,892	0,401

TABLE C.2 – Conductivité  $\sigma$  du modèle de corps humain Hugo homogène.

Fréquence (MHz)	oeil ( $kg/m^3$ )	corps ( $kg/m^3$ )
[1-100]	1010	1090

TABLE C.3 – Densité volumique  $\rho$  du modèle de corps humain Hugo homogène.

## Annexe D

# Publications personnelles

### Article soumis

- Z. Guelilia, R. Loison, et R. Gillard, “Macromodel Based DG-FDTD for Calculating Local Dosimetry in a Variable and Highly Multiscale Problem ”, *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 146, 15-24, 2014.

### Conférences internationales

- Z. Guelilia, R. Loison, et R. Gillard, “Combination of DG-FDTD with a Substitution Model for Calculating Local Dosimetry in a Variable and Highly Multiscale Problem”, dans *European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2014*, The Hague, Netherland, 6-11 Avril 2014.

### Conférences nationales

- Z. Guelilia, R. Loison, R. Gillard, et A. Laisné, “Utilisation de la DG-FDTD pour un calcul de dosimétrie dans un problème fortement multi-échelle : détermination du DAS œil pour une personne située à proximité d’une source HF/VHF embarquée sur un véhicule”, dans *Champs électromagnétiques : de la dosimétrie à la santé humaine URSI 2012*, Paris, 3-4 Avril 2012.

- 
- Z. Guelilia, R. Loison, et R. Gillard, “Combinaison de la DG-FDTD avec un modèle de substitution pour un calcul de dosimétrie locale dans un problème variable et fortement multi-échelle”, dans *18èmes Journées Nationales Microondes, JNM 2013* Paris, 15-16-17 Mai 2013.
  - Z. Guelilia, R. Loison, et R. Gillard, “Combinaison de la DG-FDTD avec un modèle de substitution pour un calcul de dosimétrie locale dans un problème variable et fortement multi-échelle”, dans *Assemblée générale GDR : “Interférences d’Ondes”*, Dijon, 28-30 Octobre 2013.

# Table des figures

1.1	Exemple d'apparition de problème multi-échelle . . . . .	6
1.2	Exemple de problème variable . . . . .	7
1.3	Schéma illustratif de la problématique générale . . . . .	8
1.4	Scénario sélectionné sur le thème de la dosimétrie . . . . .	10
1.5	Scénario sélectionné sur le thème de la transmission d'antenne . .	12
1.6	Exemple d'application de la FDTD . . . . .	14
1.7	Exemple d'application de la MR-FDTD . . . . .	16
1.8	Exemple d'application des méthodes de sous-maillage . . . . .	18
1.9	Exemple d'application de la méthode DG-FDTD . . . . .	21
1.10	Application d'un modèle mathématique pour traiter le problème variable . . . . .	23
1.11	Conception schématique du réseau de neurones . . . . .	28
1.12	Conception schématique du macromodèle basé sur le théorème de réciprocité . . . . .	29
2.1	Division en cellules de Yee d'un volume de calcul FDTD. . . . .	34
2.2	Contrainte géométrique en FDTD. . . . .	36
2.3	Différentes résolutions de la tête et des yeux du modèle Hugo. . .	40
2.4	Application de la FDTD dans le calcul du DAS local oeil gauche dans Hugo. . . . .	42
2.5	Evolution du DAS local dans l'oeil gauche de Hugo en fonction de la fréquence par les méthodes FDTD et TLM. . . . .	44
2.6	Principe de la méthode DG-FDTD multiniveau. . . . .	46
2.7	Principe de la DG-FDTD bilatérale. . . . .	47
2.8	Application de la DG-FDTD pour le calcul du DAS local oeil gauche dans Hugo. . . . .	49

2.9	Evolution du DAS local dans l'œil gauche de Hugo en fonction de la fréquence. . . . .	50
2.10	Scénario sélectionné sur le thème de la dosimétrie. . . . .	52
2.11	Décomposition DG-FDTD du problème multi-échelle. . . . .	54
2.12	Cartographie de la 1 <sup>re</sup> étape du scénario multi-échelle. . . . .	55
2.13	Cartographie de la 2 <sup>e</sup> étape du scénario multi-échelle - Tête. . . . .	56
2.14	Cartographie de la 2 <sup>e</sup> étape du scénario multi-échelle - Corps humain. . . . .	57
3.1	Principe de la méthode MM-DG-FDTD. . . . .	63
3.2	Construction du modèle de substitution : problème équivalent. . . . .	66
3.3	Construction du modèle de substitution : problème réciproque. . . . .	67
3.4	Application de la DG-FDTD classique et de la MM-DG-FDTD sur le problème. . . . .	71
3.5	Validation du modèle de substitution : présentation du cas canonique n°1. . . . .	72
3.6	Validation du modèle de substitution : application du modèle de substitution dans le cas canonique n°1. . . . .	74
3.7	Validation du modèle de substitution : différence relative entre la FDTD et le modèle de substitution pour le cas n°1. . . . .	75
3.8	Validation du modèle de substitution : présentation du cas canonique n°2. . . . .	76
3.9	Validation du modèle de substitution : application du modèle de substitution dans le cas canonique n°2. . . . .	77
3.10	Validation du modèle de substitution : différence relative entre la FDTD et le modèle de substitution pour le calcul de champ dans le cas n°2. . . . .	79
3.11	Validation du modèle de substitution : estimation du coefficient de transmission $S_{21}$ dans le cas n°2. . . . .	80
3.12	Validation de la MM-DG-FDTD : présentation du problème d'estimation du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain pour deux positions. . . . .	82
3.13	Application de la DG-FDTD classique et de la MM-DG-FDTD sur le problème d'estimation du champ électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain. . . . .	83



3.14	Application de la MM-DG-FDTD pour le problème d'estimation du champs électrique dans l'œil gauche du modèle de corps humain : pré-étape. . . . .	84
3.15	Présentation du problème entre deux antennes ULB. . . . .	86
3.16	Antenne ULB et son coefficient en reflexion simulé. . . . .	87
3.17	Application de la MM-DG-FDTD sur le problème de transmission entre antennes ULB : pré-étape. . . . .	88
3.18	Application de la DG-FDTD classique et de la MM-DG-FDTD sur le problème de transmission entre antennes ULB. . . . .	89
3.19	Validation de la MM-DG-FDTD : différence relative entre la DG-FDTD et la MM-DG-FDTD pour le calcul des champs dans le problème de transmission entre antennes ULB. . . . .	90
3.20	Validation de la MM-DG-FDTD : estimation du coefficient de transmission $S_{21}$ dans le problème de transmission entre antennes ULB. . . . .	91
4.1	Illustration du scénario de dosimétrie pour plusieurs positions. . .	97
4.2	Division de la surface du problème de dosimétrie en cellule. . . . .	98
4.3	Temps de simulation pour les deux méthodes pour la première exploitation. . . . .	100
4.4	Résultats normalisées. . . . .	100
4.5	Orientation de Hugo dans l'espace. . . . .	101
4.6	Présentation du problème fortement multi-échelle en trois étapes. . . . .	103
4.7	Pré-étape de la MM-DG-FDTD : remplacement de deux étapes. . . . .	103
4.8	Illustration du scénario d'antenne ULB dans un grand environnement complexe et variable. . . . .	105
4.9	Comparaison de l'évolution du coefficient de transmission pour différentes position pour la première configuration. . . . .	108
4.10	Évolution du coefficient de transmission calculé par la MM-DG-FDTD pour la première configuration. . . . .	109
4.11	Temps de simulation pour les deux méthodes - première configuration. . . . .	110
4.12	Évolution du coefficient de transmission calculé par la MM-DG-FDTD pour la seconde configuration. . . . .	111
4.13	Temps de simulation pour les deux méthodes - seconde configuration. . . . .	113
4.14	Pré-étape de la MM-DG-FDTD : excitation avec différentes sources dans le volume FDTD. . . . .	118

4.15	Présentation du scénario antenne sur porteur. . . . .	119
4.16	Application de l'hybridation de la DG-FDTD/IPO et du modèle de substitution sur le scénario antenne sur porteur. . . . .	120
B.1	Représentation 3D d'une surface de prélèvement S. . . . .	124

# Bibliographie

- [1] Enrico Fermi, J Pasta, and S Ulam. Studies of nonlinear problems. *I, Los Alamos Scientific Laboratory Report No. LA-1940*, 1955.
- [2] A. Laisné. *Etude d'antennes à résonateur diélectrique à l'aide de la FDTD (méthode des Différence Finies dans le Domaine Temporel) et de la MR/FDTD (méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel à Régions Multiples)*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Mai 2002.
- [3] R. Pascaud. *Nouveaux schémas rapides pour la méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD). Application à la simulation d'antennes environnées*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Décembre 2007.
- [4] C. Miry. *Schémas multigrilles pour la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)-Application à la simulation de réseaux corporels sans fil (WBAN)*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Ocotbre 2010.
- [5] site internet : <http://www.sfen.org/la-dosimetrie-des-rayonnements-aux>.
- [6] M. Clemens, S. Dickmann, A. El Ouardi, V. Hansen, M. Schaarschmidt, J. Streckert, and Yi Zhou. Numerical dosimetry schemes for the simulation of human exposure to pulsed high-power electromagnetic-field sources. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 48(2) :807–810, Feb 2012.
- [7] A. Pradier, F. Lacroux, D. Lautru, M-F Wong, V. Fouad Hanna, and J. Wiart. Influence of the homogenization of tissues on the electric field calculation in numerical dosimetry for wireless application. In *Wireless Technology, 2006. The 9th European Conference on*, pages 127–130, Sept 2006.

- [8] A.Z. El Dein and A. Amr. Specific absorption rate (sar) induced in human heads of various sizes when using a mobile phone. In *Systems Signals and Devices (SSD), 2010 7th International Multi-Conference on*, pages 1–6, June 2010.
- [9] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 ghz). *Health Physics*, 74(4) :494–522, Avril 1998.
- [10] L.C. Fung, S.W. Leung, and K. H. Chan. An investigation of the sar reduction methods in mobile phone applications. In *Electromagnetic Compatibility, 2002. EMC 2002. IEEE International Symposium on*, volume 2, pages 656–661 vol.2, Aug 2002.
- [11] site internet : [http ://www.afcem.org/content/documents/drep-dga-salon-rf-hyper-oct-2009.ppt.pdf](http://www.afcem.org/content/documents/drep-dga-salon-rf-hyper-oct-2009.ppt.pdf).
- [12] Xuan Hui Wu, Zhi Ning Chen, and Ning Yang. Optimization of planar diamond antenna for single-band and multiband uwb wireless communications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 42(6) :451–455, 2004.
- [13] T. Weiland. A discretization method for the solution of maxwell’s equations for six component fields. *Electronics and Communication*, 31 :116–120, Septembre 1977.
- [14] M. Clemens and T. Weiland. Discrete electromagnetism with the finite integration technique. *Progress In Electromagnetics Research, PIER*, 32, 2001.
- [15] P. B. Johns and R. L. Beurle. Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix. *Proceedings of the IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 118, 1971.
- [16] C. Christopoulos. The transmission-line modeling method. *The Institute of Electrical and Electronic Engineers (New York and Oxford University Press)*, 1995.
- [17] L. Vietzorreck K.P. Heppenheimer and P. Russer. Analysis and design of a planar antenna for a millimetre-wave emitter using tlm. *Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International*, (3) :2027–2030, 2001.

- 
- [18] A.Ait.Ouahman A.Latif and R.Hilal. Design of the microstrip antennas for wireless communications "by tlm model". *Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International*, pages 621–624, 2007.
  - [19] V. Dhoot and S. Gupta. Return loss validation of a novel cantor based antenna using fit and fdtd. *Communications and Signal Processing (ICCSP)*, pages 374–378, 2011.
  - [20] A. Laisné and J. Drouet. Comparison of finite integration technique (fit) and transmission line matrix (tlm) for numerical dosimetry in hf/vhf band. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2013)*, 2013.
  - [21] Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 14(3) :302–307, May 1966.
  - [22] Allen Taflove. Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady-state electromagnetic-penetration problems. *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, EMC-22(3) :191–202, Aug 1980.
  - [23] K. L. Shlager and J. B. Schneider. A selective survey of the finite-difference time-domain literature. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 37(4) :39–57, Août 1995.
  - [24] J. M. Johnson and Y. Rahmat-Samii. Multiple-region fdtd (mr/fdtd) and its application to microwave analysis and modeling. In *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, volume 3, pages 1475–1478, San Francisco, CA, Juin 1996.
  - [25] P. Bernardi, M. Cavagnaro, P. D'Atanasio, E. Di Palma, S. Pisa, and E. Piuze. Fdtd, multiple-region/fdtd, ray-tracing/fdtd : a comparison on their applicability for human exposure evaluation. *International Journal of numerical modelling*, 15 :579–593, 2002.
  - [26] A. Laisné, R. Gillard, J. Citerne, and G. Piton. A discrete wavelet transform (dwt)-based compression technique for the computation of kirchhoff integrals in mr/fdtd. *Microwave and Optical Technology Letters*, 27(5) :312–316, Décembre 2000.

- 
- [27] A. Laisné, R. Gillard, and G. Piton. A new multiresolution near-field to near-field transform suitable for multi-region fdtd schemes. In *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, volume 2, pages 893–896, Phoenix, AZ, Mai 2001.
- [28] K. S. Kunz and L. Simpson. A technique for increasing the resolution of finite-difference solutions of the maxwell equation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EMC-23(4) :419–422, Novembre 1981.
- [29] Jonathan L Herring and Christos Christopoulos. Solving electromagnetic field problems using a multiple grid transmission-line modeling method. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 42(12) :1654–1658, 1994.
- [30] Z. LI, S. LE MAGUER, and M. M. NEY. Non-cartesian tlm-cell and block meshing for waveguide discontinuity characterization with arbitrary geometry. *13th conference on microwave techniques*, September 2005.
- [31] S. Chaillou. *Le sous-maillage dans la FDTD. Application à la dosimétrie des radiotéléphones*. PhD thesis, Université Paris 6, Septembre 1999.
- [32] A.J. Johansson. Wave-propagation from medical implants-influence of body shape on radiation pattern. In *Engineering in Medicine and Biology. 24th Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society EMBS/BMES Conference, 2002. Proceedings of the Second Joint*, pages 1409–1410, Octobre 2002.
- [33] R. Kopecky and M. Persson. Subgridding method for fdtd modeling in the inner ear. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 398–401, Avril 2004.
- [34] Chi Chung Wong and Wing Sun Wong. Multigrid tlm for diffusion problems. *International Journal of Numerical Modelling : Electronic Networks, Devices and Fields*, 2(2) :103–111, 1989.
- [35] M Le Doze, MM Ney, and S Le Maguer. Full-wave diakoptics for fast structure optimization. *URSI EMTS*, Avril 2004.
- [36] J Wlodarczyk. New multigrid interface for the tlm method. *Electronics Letters*, 32(12) :1111–1112, 1996.
- [37] G. Romo and T. Smy. Efficient simulation of photonic crystals using the transmission line matrix method. *URSI EMTS*, Avril 2004.

- 
- [38] J. P. Bérenger. A Huygens subgridding for the FDTD method. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54(12) :3797–3804, Décembre 2006.
  - [39] F. Collino, T. Fouquet, and P. Joly. Conservative space-time mesh refinement methods for the fdtd solution of maxwell’s equations. *J. Comput. Phys.*, 211 :9–35, 2006.
  - [40] M. Bonilla, M. F. Wong, and V. Fouad-Hanna. A finite-element formulation for fdtd subgridding. *Microwave and Optical Technology Letters*, 32(2) :104–108, Janvier 2002.
  - [41] Kai Xiao, D.J. Pommerenke, and J.L. Drewniak. A three-dimensional fdtd subgridding algorithm with separated temporal and spatial interfaces and related stability analysis. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(7) :1981–1990, Juillet 2007.
  - [42] J. Gazave, A. Reineix, and J. P. Seaux. 3d space-time subgridding algorithm for fdtd. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE*, pages 3065–3068, June 2007.
  - [43] Huiling Jiang and Hiroyuki Arai. Fast and efficient fdtd analysis using non-uniform mesh for small antenna. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1998. IEEE*, volume 2, pages 1242–1245 vol.2, June 1998.
  - [44] Huiling Jiang and H. Arai. 3d fdtd analysis by using non-uniform mesh. In *Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, 1998. ICMMT ’98. 1998 International Conference on*, pages 947–950, 1998.
  - [45] Ren Wu, Gao Benqing, and Yang Shiming. An improved method in fdtd simulation to reduce reflection from non-uniform mesh. In *Microwave and Millimeter Wave Technology, 2002. Proceedings. ICMMT 2002. 2002 3rd International Conference on*, pages 646–649, Aug 2002.
  - [46] Luca Pierantoni and Tullio Rozzi. A general multigrid-subgridding formulation for the transmission line matrix method. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 55(8) :1709–1716, 2007.
  - [47] PB Johns and K Akhtarzad. Time domain approximations in the solution of fields by time domain diakoptics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 18(9) :1361–1373, 1982.

- 
- [48] MM Ney and S Le Maguer. Diakoptics : An efficient technique for emc applications. *Proc. Electromagnetic Compatibility*, pages 339–342, 1999.
  - [49] W. L. Stutzman and G. A. Thiele. *Antenna theory and design*. John Wiley and Sons. Inc., 1981.
  - [50] J.M Jin. *Theory and computation of electromagnetic fields*. John Wiley and Sons. Inc., 2010.
  - [51] R. Pascaud, R. Gillard, R. Loison, J. Wiart, and M. F. Wong. Exposure assessment using the dual-grid finite-difference time-domain method. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 18(10) :656–658, Octobre 2008.
  - [52] R. Pascaud, R. Gillard, R. Loison, J. Wiart, and M. F. Wong. Dual-grid finite-difference time-domain scheme for the fast simulation of surrounded antennas. *IET Microwave Antennas and Propagation*, 1(3) :700–706, Juin 2007.
  - [53] R. Gillard C. Miry and R. Loison. An application of the multi-level DG-FDTD to the analysis of the transmission between a dipole in free-space and an implanted antenna in a simplified body model with various positions. In *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP*, pages 67–70, Mars 2009.
  - [54] C. Miry, R. Loison, and R. Gillard. Une application de la dg-fdtd mult niveau dans le contexte des body area networks. In *16 èmes Journées Nationales Microondes*, Grenoble, France, Mai 2009.
  - [55] N. Metropolis. The beginning of the monte carlo method. In *Los Alamos Science*, volume 15, pages 125–130, 1987.
  - [56] N. Metropolis and S. Ulam. The monte carlo method. In *Journal of the American Statistical Association*, volume 44, pages 335–341, 1949.
  - [57] Cheol Hea Koo Lee, June Kyu Lee, and Hyun Soo Lim. Monte carlo simulation to measure light dosimetry within the biological tissue. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 1998. Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE*, volume 6, pages 2967–2969 vol.6, Oct 1998.



- [58] Yangyang Zhang, Chunlin Ji, W.Q. Malik, Yi Liu, D. O'brien, and D.J. Edwards. Joint antenna and user selection algorithm for uplink of multiuser mimo systems using sequential monte carlo optimization. In *Statistical Signal Processing, 2007. SSP '07. IEEE/SP 14th Workshop on*, pages 493–496, Aug 2007.
- [59] WanLi Jia, WeiLi Ji, and W. Shi. Monte carlo simulation of terahertz radiation waveform from si-gaas photoconductive antennas. In *Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, 2006. IRMMW-THz 2006. Joint 31st International Conference on*, pages 125–125, Sept 2006.
- [60] J. Silly-Carette, D. Lautru, M.-F. Wong, A. Gati, J. Wiart, and V.F. Hanna. Variability on the propagation of a plane wave using stochastic collocation methods in a bio electromagnetic application. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 19(4) :185–187, April 2009.
- [61] B. Sudret. *Uncertainty propagation and sensitivity analysis in mechanical models – Contributions to structural reliability and stochastic spectral methods*. PhD thesis, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France, 2007.
- [62] J. Wiart, E. Conil, A. Hadjem, M. Jala, P. Kersaudy, and N. Varsier. Handle variability in numerical exposure assessment : The challenge of the stochastic dosimetry. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2013 7th European Conference on*, pages 1979–1981, April 2013.
- [63] I.S. Isa, Z. Saad, S. Omar, M.K. Osman, K.A. Ahmad, and H. A M Sakim. Suitable mlp network activation functions for breast cancer and thyroid disease detection. In *Computational Intelligence, Modelling and Simulation (CIMSIM), 2010 Second International Conference on*, pages 39–44, Sept 2010.
- [64] Sheng Chen, A. Wolfgang, C.J. Harris, and L. Hanzo. Symmetric rbf classifier for nonlinear detection in multiple-antenna-aided systems. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 19(5) :737–745, May 2008.
- [65] M. Pastorino and A. Randazzo. A smart antenna for the doa estimation of impinging signals and passive obstacle detection for homeland security. In *Measurement Systems for Homeland Security, Contraband Detection*

- and Personal Safety Workshop, 2005. (IMS 2005) Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on*, pages 70–75, March 2005.
- [66] site internet : <http://uhaweb.hartford.edu/compsci/neural-networks-definition.html>.
- [67] R.Gschwind E.Martin S.Contassot-Vivier et J.Bahi R.Mathieu, L.Makovicka. Utilisation des rna en dosimétrie. *20 ème journée des L.A.R.D*, Octobre 2003.
- [68] O.-R.J. Manuel, M.-B.M. del Rosario, G. Eduardo, and V.-C.H. Rene. Artificial neural networks modeling evolved genetically, a new approach applied in neutron spectrometry and dosimetry research areas. In *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2008. CERMA '08*, pages 387–392, Sept 2008.
- [69] Marc Sauget. *Parallélisation de problèmes d'apprentissage par des réseaux neuronaux artificiels-Application en radiothérapie externe*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, Décembre 2007.
- [70] J.M. Ortiz-Rodriguez, M.R. Martinez-Blanco, G. Eduardo, and H.R. Vega-Carrillo. A computational tool design for evolutionary artificial neural networks in neutron spectrometry and dosimetry. In *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2009. CERMA '09.*, pages 113–118, Sept 2009.
- [71] M.-B. Rosario, O.-R.J. Manuel, and V.-C.H. Rene. A new computer tool based on ann technology, applied in neutron spectrometry and dosimetry research areas. In *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2008. CERMA '08*, pages 189–194, Sept 2008.
- [72] V. Vairavanathan. *FDTD Characterization of Antenna-Channel Interactions via Macromodeling*. PhD thesis, University of Toronto, 2010.
- [73] A. Taflové and S. C. Hagness. *Computational Electrodynamics : The Finite-Difference Time-Domain Method, Third Edition*. Artech House, 2005.
- [74] J. P. Bérenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114(2) :185–200, Octobre 1994.

- 
- [75] M. Cai, H. Zhou, and N.N. Ljepojevic. Ideal absorption condition for fdtd method in isotropic lossy dispersive media. In *High Frequency Post-graduate Student Colloquium, 1996., 2nd*, pages 51–57, Sep 1996.
- [76] Allen Taflove and M.E. Brodwin. Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent maxwell's equations. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 23(8) :623–630, Aug 1975.
- [77] A. Taflove and M. E. Brodwin. Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent maxwell's equations. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-23(8) :623–630, Août 1975.
- [78] Constantine A Balanis. *Antenna theory : analysis and design*. John Wiley & Sons, 2012.
- [79] A. Taflove and S. C. Hagness. *Computational Electrodynamics : The Finite-Difference Time-Domain Method, Third Edition*. Artech House, 2005.
- [80] The visible human project®,"<http://www.nlm.nih.gov/research/visible/>".
- [81] M. Vuchkovikj, I. Munteanu, and T. Weiland. Numerical approach for separation and movement of the fingers of the hugo model for analysis of sar distribution. In *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2013 21st International Conference on*, pages 1–5, Sept 2013.
- [82] Application of the hugo model on cst,"<https://www.cst.com/applications/article/hugo-human-body-model>".
- [83] S. D. Gedney. An anisotropic perfect matched layer-absorbing medium for the truncation of fdtd lattices. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 44(12) :1630–1639, Décembre 1996.
- [84] B. Le Lepvrier, R. Loison, R. Gillard, P. Pouliguen, P. Potier, and L. Pattier. A new hybrid method for the analysis of surrounded antennas mounted on large platforms. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 62(5) :2388–2397, May 2014.



## AVIS DU JURY SUR LA REPRODUCTION DE LA THESE SOUTENUE

**Titre de la thèse:**

Modélisation électromagnétique rapide de problèmes multi-échelles incluant une partie variable - Application à la dosimétrie numérique et au couplage entre antennes

**Nom Prénom de l'auteur : GUELILIA ZAKARIA**

**Membres du jury :**

- Monsieur GILLARD Raphaël
- Monsieur LOISON Renaud
- Monsieur NEY Michel
- Monsieur REINEX Alain
- Monsieur LAUTRU David
- Monsieur LAISNE Alexandre

**Président du jury :** *Monsieur Michel NEY*

**Date de la soutenance :** 21 Octobre 2014

Reproduction de la these soutenue

Thèse pouvant être reproduite en l'état

~~Thèse pouvant être reproduite après corrections suggérées~~

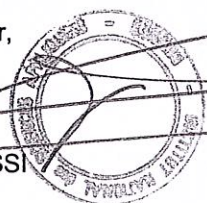
Fait à Rennes, le 21 Octobre 2014

Signature du président de jury

*M. NEY*  
M. NEY

Le Directeur,

M'hamed DRISSI



La simulation numérique est un outil indispensable pour la résolution de problèmes électromagnétiques. Le temps de calcul ainsi que la précision des résultats dépendent du niveau de description utilisé et des dimensions électriques du problème analysé. Dans le cas de figure où il est nécessaire de modéliser un environnement électriquement grand, l'emploi de méthodes classiques comme la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) se heurte à des difficultés en termes de temps de simulation. Cet aspect devient particulièrement problématique quand l'analyse doit être menée pour plusieurs valeurs d'un ou plusieurs paramètres définissant le problème étudié. Face à cette variabilité et afin d'éviter la multiplication de simulations coûteuses, il est nécessaire d'opter pour des méthodes appropriées.

Les travaux de cette thèse sont consacrés au développement d'une nouvelle approche permettant de résoudre de manière efficace l'aspect variable rencontré dans un problème multi-échelle. Cette nouvelle méthode issue de l'association de la FDTD à Grille Double (DG-FDTD) avec un modèle de substitution se nomme la MM-DG-FDTD (Macro-Modèle basé sur la DG-FDTD). L'emploi de la DG-FDTD vise à traiter l'aspect multi-échelle en divisant le problème étudié en sous-volumes FDTD possédant chacun ses propres paramètres de simulation. L'utilisation d'un modèle de substitution rapide construit en peu de simulations électromagnétiques permet de remplacer rigoureusement et rapidement la dernière simulation de la DG-FDTD.

Après avoir validé le bon fonctionnement du modèle de substitution sur des cas simples, une utilisation de la MM-DG-FDTD est effectuée sur deux applications inscrites dans deux contextes : la dosimétrie numérique et le couplage entre antennes. La première propose d'estimer la valeur du champ électrique à l'intérieur de l'œil gauche d'un modèle de corps humain. Ce dernier est soumis au rayonnement électromagnétique d'une antenne localisée sur un véhicule. Cette étude est effectuée pour un grand nombre de positions du corps autour du véhicule. La seconde application consiste à évaluer la valeur du coefficient de transmission entre deux antennes ULB (Ultra-Large Bande). La position de l'antenne de réception évolue au sein d'un grand environnement. Pour ces deux études, la MM-DG-FDTD montre sa capacité à donner des résultats rapides et précis en comparaison d'une utilisation classique de la DG-FDTD.

Numerical modelling is an essential tool for solving electromagnetic problems. The computation time and the accuracy of the results depend on the description level used and electrical dimensions of the analyzed problem. When it is necessary to model an electrically large environment, the use of conventional methods such as the finite difference time domain (FDTD) face difficulties in terms of simulation time. This becomes particularly problematic when the analysis must be carried out for several values of one or more parameters defining the studied problem. Considering this variability aspect and in order to avoid multiplication of costly simulations, it is necessary to choose suitable methods.

This thesis aims to develop a new approach to solve effectively the variable feature encountered in some multi-scale problems. This new method called the MM-DG-FDTD (MacroModel based Dual Grid-FDTD) results from the association of the Dual Grid-FDTD (DG-FDTD) method with a substitution model. The use of the DG-FDTD permits to treat multiscale aspect dividing the studied problem into FDTD sub-volumes. Each step has its own simulation parameters. The fast substitution model built in few electromagnetic simulations replaces in a rigorous and efficient way the last expensive DG-FDTD simulation.

The proper operation of the substitution model is firstly validated using simple cases. Next, a use of the MM-DG-FDTD is performed on two applications belonging to two contexts: numerical dosimetry and antennas coupling. The first one proposes to estimate the value of the electric field inside the left eye of a human body model. It receives electromagnetic radiation from an antenna located onboard a vehicle. This study is carried out for a large number of positions of the body around the vehicle. The second application is to assess the value of the transmission coefficient between two ULB (Ultra-Wide Band) antennas. The position of the receiving antenna changes in a large environment. For both studies, MM-DG-FDTD shows its ability to give fast and accurate results compared to a classic use of the DG-FDTD.